



Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Diagnóstico de anomalías en motores eléctricos de inducción a partir del análisis de parámetros electromecánicos.

Titulación: Ingeniería Industrial

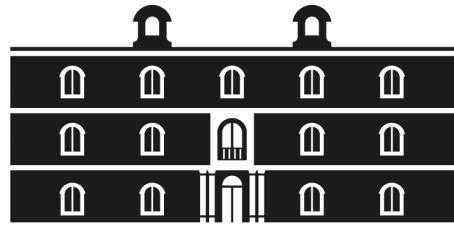
Alumno: José Fructuoso Gabarrón

Director: José Luís Aguirre Martínez

Cartagena, 25 de Julio de 2013.



Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Diagnóstico de anomalías en motores eléctricos de inducción a
partir del análisis de parámetros electromecánicos.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer y dedicar este texto a los compañeros, amigos y familiares que en mi etapa universitaria me han mostrado su apoyo o simplemente han estado ahí, sin los cuales no hubiera conseguido estar donde estoy.

Índice general

Índice general	VIII
Índice de figuras	XV
Glosario de términos	XVII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes.	1
1.2. Objetivos.	2
1.3. Metodología de estudio.	2
2. Base teórica	5
2.1. Tratamiento de los datos	5
2.2. Estudio del espectro frecuencial de la TMF.	8
2.2.1. Excentricidad:	9
2.2.2. Defectos en los rodamientos:	10

2.2.3. Asimetría rotórica:	11
2.2.4. Pérdida de aislamiento:	12
2.3. Relación entre la amplitud y la velocidad de giro de la TMF	13
2.4. Orbital de la TMF	14
2.4.1. Excentricidad:	16
2.4.2. Asimetría rotórica:	17
2.4.3. Pérdida de aislamiento:	18
2.5. Deslizamiento instantáneo entre la tensión magnética y el rotor.	18
2.5.1. Excentricidad:	19
2.5.2. Asimetría rotórica:	21
2.5.3. Pérdida de aislamiento:	21
3. Desarrollo del programa	23
3.1. Introducción	23
3.2. Captación de datos	25
3.2.1. Configuración de la captación	25
3.2.2. Captación de los datos y visualización de los resultados	28
3.3. Guardado y apertura de los datos	28
3.4. Obtención de los indicadores	30
3.4.1. Configuración del bobinado	30

3.4.2.	Configuración de los datos necesarios para la obtención de los indicadores	32
3.4.3.	Obtención de los indicadores y representación	34
3.4.4.	Guardar indicadores	37
3.5.	Captación continua	38
3.5.1.	Configuración de la captación continua.	38
3.5.2.	Funcionamiento de la captación continua	40
4.	Ensayos experimentales	41
4.1.	Introducción	41
4.2.	Pruebas iniciales con el motor en buen estado.	41
4.2.1.	Captación con el sistema ideado en este proyecto.	42
4.2.2.	Sistema One-Pro	43
4.3.	Ensayos de excentricidad mecánica.	43
4.3.1.	Realización del ensayo	44
4.3.2.	Resultados obtenidos	44
4.3.3.	Sistemas comerciales	49
4.3.4.	Conclusiones del ensayo de excentricidad.	49
4.4.	Ensayos de defecto y fallo de rodamientos.	50
4.4.1.	Realización del ensayo	50
4.4.2.	Resultados obtenidos	51

4.4.3.	Sistemas comerciales	52
4.4.4.	Conclusiones del ensayo.	54
4.5.	Ensayos de pérdida de aislamiento.	55
4.5.1.	Realización del ensayo	55
4.5.2.	Resultados obtenidos	56
4.5.3.	Sistemas comerciales	59
4.5.4.	Conclusión del ensayo	60
4.6.	Ensayos de rotura de barras del rotor.	60
4.6.1.	Realización del ensayo	60
4.6.2.	Resultados obtenidos	61
4.6.3.	Sistemas comerciales	65
4.6.4.	Conclusión del ensayo.	66
5.	Conclusiones y futuras líneas de trabajo	67
5.1.	Conclusiones.	67
5.1.1.	Conclusiones sobre los indicadores.	67
5.1.2.	Conclusiones sobre el sistema de captación.	68
5.1.3.	Conclusiones sobre el programa.	69
5.1.4.	Conclusión sobre el proyecto	69
5.2.	Futuras líneas de trabajo	69
5.2.1.	Sobre el sistema de captación	70
5.2.2.	Sobre el software desarrollado	70
5.2.3.	Sobre los indicadores	70

Bibliografía y referencias	72
Anexos	74
A. Banco de ensayos y sistemas comerciales.	75
A.1. Banco de ensayos	75
A.1.1. Motor eléctrico	77
A.1.2. Bomba centrífuga	78
A.2. Sistemas comerciales.	78
A.2.1. Sistema OneProD	79
A.2.2. Sistema MCM	79
B. Sistema de medida.	81
B.1. Medida de las intensidades	81
B.2. Medida de la velocidad	82
B.3. Tarjeta de adquisición y comunicación con el ordenador	84
B.4. Medida del error de la obtención de la velocidad instantánea	87

C. Algoritmos característicos.	89
C.1. Corregir la captación de la velocidad	89
C.1.1. Iniciación de la matriz de velocidades y descarga del buffer.	89
C.1.2. Eliminar errores cometidos por el contador.	91
C.1.3. Suavizar la curva de velocidades.	92
C.2. Obtención del orbital.	94
C.3. Velocidad media de giro	95
C.4. Búsqueda de los picos al obtener indicadores.	95

Índice de figuras

2.1. Amplitud de la tensión magnética en el entrehierro del motor que se ha llevado a ensayo en función de la ranura del estátor para tres instantes de tiempo distintos.	6
2.2. Mapa espectral del módulo de la tensión magnética de entrehierro para un motor de 4,6 kW, con 2 pares de polos y un correcto estado funcional.	6
2.3. Diagrama de bloques para el tratamiento de datos, con los bloques necesarios para el cálculo del fasor de tensión magnética y de las señales basadas en éste, y utilizadas en las diferentes técnicas propuestas posteriormente.	7
2.4. Diagrama de bloques en el que se representa el proceso de cálculo del orbital de la componente fundamental de la tensión magnética en el entrehierro. En la parte inferior se presentan tres formas de obtener el ángulo para cada instante de tiempo: a) suponiendo que los valores de la tensión llevan una velocidad angular igual a la del rotor, b) suponiendo que los valores de la tensión llevan una velocidad angular igual al deslizamiento absoluto y c) suponiendo que el sistema de referencia no gira. Cada una de ellas se utilizará según interese para caracterizar un defecto u otro.	15
2.5. Representación de un orbital normal y otro con excentricidad estática de 87 %, para un motor de inducción. Este orbital ha sido obtenido mediante el modelo de motor de inducción presentado en la tesis configurado para 3 kW, 4 pares de polos y 20 Nm de carga.	16

2.6.	Orbital característico para un motor de inducción de 4 pares de polos y con asimetría rotórica. Este orbital ha sido obtenido mediante el modelo de motor de inducción presentado en el la tesis y configurado con 4 pares de polos, 31 Nm de carga, 44 barras en el rotor de las cuales 3 están totalmente fracturadas. .	17
2.7.	Orbital característico para un motor de inducción de 4 pares de polos con perdida de aislamiento. Este orbital ha sido obtenido mediante el modelo de motor de inducción presentado en la tesis, con 4 espiras cortocircuitadas y configurado para 3 kW, 4 pares de polor y 32 Nm de carga.	18
2.8.	Patrón característico, en el espectro $Sw_{Fr}^n(f)$, de un defecto de excentricidad estática. a)Obtenido mediante el modelo de la tesis. b) Obtenido mediante ensayo para el motor AL-235, con 4 pares de polos, una carga de ≈ 2 Nm y una excentricidad estática de $\approx 87\%$	20
2.9.	Espectro característico para un motor de inducción con asimetría rotórica y 4 pares de polos. Este orbital ha sido obtenido mediante el modelo de motor de inducción presentado en el capítulo 4 y configurado con 4 pares de polos, 31 Nm de carga, 44 barras en el rotor, de las cuales 2 están totalmente fracturadas.	21
2.10.	Comparación del Sw_{Fr}^n en las bandas de f_e y $2f_e$, entre un motor con un desequilibrio eléctrico de 2 voltios en una de sus fases y el mismo pero con 4 espiras cortocircuitadas. a) Obtenido mediante modelo, b) obtenido mediante ensayo con el motor AL-235, con 4 pares de polos y una carga de ≈ 32 Nm. . .	22
3.1.	Diagrama de bloques sobre el funcionamiento del programa. Los bloques de perfil verdes son ventanas y los bloques de perfil rojo son las funciones principales que interactuan con los demás elementos del programa.	24
3.2.	Ventana principal del programa.	25
3.3.	Abrir la ventana de <i>configuración</i> en la pestaña <i>Captación</i>	26
3.4.	Ventana de <i>configuración</i> en la pestaña <i>Captación</i>	26

3.5.	Apertura de los cuadros de dialogo de guardar y abrir un archivo de datos.	29
3.6.	Muestra de una apertura de datos.	29
3.7.	Abrir la ventana de configuración del bobinado	31
3.8.	Ventana de configuración pestaña del bobinado.	31
3.9.	Muestra la <i>matriz de conexiones</i> del motor utilizado normalmente para la ex- perimentación desde el propio programa.	32
3.10.	Ventana de configuración de los parámetros necesarios para la obtención de los indicadores	33
3.11.	Ejecutar el tratamiento de datos y la obtención de indicadores.	34
3.12.	Ventana principal tras la obtención de los indicadores donde se puede visualizar como se exponen los indicadores.	35
3.13.	Ventana donde se representan los valores temporales y frecuenciales mas ca- racterísticos del estudio.	35
3.14.	Ventana donde se representan los orbitales estudiados en el capítulo 2.	36
3.15.	Opciones en el programa para el guardado de indicadores.	37
3.16.	Menú para la apertura de la configuración de la captación continua.	38
3.17.	Pestaña de la configuración de captación continua.	39
3.18.	Ejemplo de matriz de indicadores.	40
4.1.	Comparación de los indicadores para los dos estátores utilizados en estado nor- mal, sin producirles ningún defecto. A la izquierda estátor reparado y a la de- recha datos de los indicadores en el estátor nuevo	42

4.2. Ventana de alarmas del sistema One-Pro durante el ensayo con el motor en buen estado.	43
4.3. Tapadera usada para provocar la excentricidad.	44
4.4. Indicadores obtenidos en los ensayos de excentricidad en escala logarítmica. . .	45
4.5. Indicador I_{ETMF}^{e1} (Iee1 en la terminología del programa) en los ensayos de excentricidad	46
4.6. Indicador I_{ETMF}^{e2} (Iee2 en la terminología del programa) en los ensayos de excentricidad	46
4.7. Indicador I_{ETMF}^{e3} (Iee3 en la terminología del programa) en los ensayos de excentricidad	47
4.8. a.Orbital de excentricidad en el ensayo con el motor en buen estado. b. Orbital de excentricidad en el ensayo de excentricidad.	48
4.9. Evolución del indicador I_S^e (Ise en la terminología del programa) en los ensayos de excentricidad	49
4.10. Rodamiento defectuoso usado en el ensayo.	50
4.11. Valor de todos los indicadores obtenidos en el ensayo de defecto en rodamientos (las últimas 20 captaciones de la derecha), frente a los obtenidos en el ensayo con el motor en buen estado (las 20 primeras captaciones de la izquierda) .	51
4.12. Evolución del indicador de excentricidad Iee (I_{ETMF}^{e1}) en el ensayo de defecto en rodamiento.	52
4.13. Evolución del indicador de fallo en pista exterior del rodamiento Ipe (I_{ETMF}^{pe}) en el ensayo de defecto en rodamiento.	53
4.14. Evolución del indicador de fallo en pista interior del rodamiento Ipi (I_{ETMF}^{pe}) en el ensayo de defecto en rodamiento.	53

4.15. Ventana de alarmas proporcionada por el sistema One-Pro durante el ensayo de defecto en rodamiento.	54
4.16. Pérdida de aislamiento provocada en la bobina I_t del estátor.	55
4.17. Evolución gráfica de la evolución en la pérdida de aislamiento.	56
4.18. Gráfico con todos los indicadores en el ensayo de pérdida de aislamiento. A la izquierda se puede observar el valor de los indicadores obtenidos en el ensayo con el motor en buen estado, y a la derecha induciéndole el defecto de pérdida de aislamiento.	57
4.19. Evolución del indicador de pérdida de aislamiento en la técnica basada en el espectro frecuencial de la TMF en el ensayo de pérdida de aislamiento.	58
4.20. a.Orbital de defecto de aislamiento en el ensayo con el motor en buen estado. b. Orbital de defecto en aislamiento en el ensayo de defecto de aislamiento. . .	58
4.21. Evolución del indicador de pérdida de aislamiento en la técnica basada en el deslizamiento instantáneo entre la tensión magnética y el rotor en el ensayo de pérdida de aislamiento.	59
4.22. Rotor utilizado en el ensayo de barras fracturadas	60
4.23. Intensidades en un ensayo de fractura de barras	61
4.24. Representación de todos los indicadores en el motor normal (izquierda) y provocándole el defecto de asimetría rotórica (derecha), representación en escala logarítmica.	62
4.25. Evolución del indicador I_{ETMF}^a denominado Ia en el programa en el defecto de asimetría rotórica.	62
4.26. Muestra de la referencia en pantalla del indicador I_{A-V}^a y los límites según el número de barras fracturadas	63

4.27. Muestra de la evolución del indicador I_{A-V}^a mientras se le producía el defecto al motor de rotura de barras	64
4.28. a.Orbital de asimetría rotórica en el ensayo con el motor en buen estado. b. Orbital de asimetría rotórica en el ensayo de asimetría rotórica.	64
4.29. Muestra de la evolución del indicador I_S^a mientras se le producía el defecto al motor de rotura de barras	65
4.30. Ventana de alarmas proporcionada por el sistema One-Pro durante el ensayo de rotura de barras.	66
A.1. Banco de ensayos utilizado.	76
A.2. Motor eléctrico Siemens 1LE10021AB522AA0.	77
A.3. Bomba centrífuga KSB Etacrhom NC 32-125	78
A.4. Sistema OneProD. A) Sonda de velocidad. B) Acelerómetro horizontal. C) Acelerómetro vertical.	79
A.5. Sistema de monitorización compacto MCM de Artensis	80
B.1. Transductores de anillo instalados en las fases del motor.	81
B.2. Datos eléctricos de los transductores de anillo usados	82
B.3. Instalación del encoder utilizado para la medida de la velocidad instantánea de rotación	83
B.4. Contador casero usado para conseguir la medida instantánea de la velocidad. A) Salida a 15V hacia el encoder, B)Divisor de tensión antes de la entrada a 5V y C) Salida digital hacia la tarjeta adquisición.	83

B.5. Tarjeta de adquisición WaveBook/516 donde los puntos referenciados son: A) entradas analógicas. B)Entrada digital. C)Salida de datos digital. D) Alimentación.	85
B.6. Adaptador compatible con la tarjeta de adquisición modelo WBK20A.	85
B.7. Drivers utilizados y última versión utilizada para la correcta conexión de la tarjeta de adquisición WaveBook/516	86
B.8. Ensayo de conexión entre la tarjeta de adquisición y los drivers instalados en el equipo.	86
B.9. Instrumentación láser usada para la medida del error en la captación de la velocidad.	87
B.10. Medida del error de la captación de la velocidad comparándola con la velocidad captada por el sistema láser del laboratorio	88
C.1. Ventana de adquisición de datos mostrando un fallo típico del contador en la muestra 923.	92
C.2. Ventana de adquisición de datos mostrando la señal de la velocidad antes de realizarle la media móvil.	93
C.3. Ventana de adquisición de datos mostrando la señal de la velocidad después de realizarle la media móvil.	94
C.4. Zoom del diagrama frecuencial mostrando en el eje de abscisas en número de dato, y en el de ordenadas la amplitud de F_{w-full}^p	96

Glosario de términos

Símbolo en la formulación	Variable en el software	Nombre del término.
Bob	Bob	Matriz de conexiones.
	Buffer	Vector donde la librería que se comunica con los drivers guarda los datos.
C	C	Número de capas del bobinado del motor.
d_b		Diámetro del elemento rodante del rodamiento del motor.
d_m		Diámetro medio del rodamiento del motor.
$f_B()$		Función de bobinado.
f_{dpe}		Frecuencia característica para el defecto de pista exterior en el rodamiento.
f_{dpi}		Frecuencia característica para el defecto de pista interior en el rodamiento.
f_{db}		Frecuencia característica para el defecto de lesión en el elemento rodante.
f_e	fe	Frecuencia de red.
$f_{fmm}()$		Función fmm.
f_g	fg	Velocidad media de giro del eje en hercios.
$f_I()$		Función de distribución de corriente.
$\vec{F}_{\theta,t}$		Fasor de la tensión magnética del entrehierro.
\vec{F}_t^p	FFTE	Componente espacial fundamental del fasor de la tensión magnética (TMF).
F_{w-full}^p	FFTT	Módulo del espectro completo de la TMF.

F_{w-full}^{pn}	Fwpn	Módulo del espectro completo de la TMF normalizado.
F_w^p	FFTM	Espectro del módulo de la TMF.
F_w^{pn}	Fpn	Espectro del módulo de la TMF normalizado.
F_{A-V}^{pn}		Amplitud de la tensión magnética normalizado para la técnica A-V.
	i	Variable de apoyo usada normalmente para contar durante la programación.
i_R	Canal[1]	Corriente de la fase R que alimenta al motor.
i_S	Canal[2]	Corriente de la fase S que alimenta al motor.
i_T	Canal[3]	Corriente de la fase T que alimenta al motor.
I_{ETMF}^{e1}	Iee1	Indicador de excentricidad número uno, técnica del espectro de la TMF.
I_{ETMF}^{e2}	Iee2	Indicador de excentricidad número dos, técnica del espectro de la TMF.
I_{ETMF}^{e3}	Iee3	Indicador de excentricidad número tres, técnica del espectro de la TMF.
I_{ETMF}^{pe}	Ipe	Indicador de defecto de pista exterior en el rodamiento(espectro de la TMF).
I_{ETMF}^{pi}	Ipi	Indicador de defecto de pista interior en el rodamiento(espectro de la TMF).
I_{ETMF}^a	Ia	Indicador de asimetría rotórica con la técnica del espectro de la TMF.
I_{A-V}^a	Iav	Indicador de asimetría rotórica con la técnica amplitud y velocidad de TMF.
I_S^e	Ise	Indicador de excentricidad con la técnica del deslizamiento instantáneo.
I_S^a	Isa	Indicador de asimetría rotórica con la técnica del deslizamiento instantáneo.
I_S^{pa}	Ispa	Indicador de pérdida de aislamiento con la técnica del deslizamiento instantáneo.
\vec{I}_d		Vector de distribución de corriente.

	j	Variable de apoyo usada normalmente para contar durante la programación.
K	K	Número de ranuras del estator.
	l	Variable de apoyo usada normalmente para contar durante la programación, permanece constante durante un periodo de tiempo con el siguiente numero de la función 2^n a numScans.
M		Una constante para la técnica amplitud y velocidad de TMF(A-V).
n		Número de barras del rotor.
	numChans	Es el número de canales usado, al final permanece constante en 4 para agilizar el programa.
	numScans	Es el número de datos con el que se va a trabajar (el resultado mejora aproximandolo a 2^n).
N	N	Matriz del número de espigas por bobina.
N_b		Número de elementos rodantes del rodamiento.
η		Ángulo de contacto de los elementos del rodamiento sobre las pistas.
p	p	Número de pares de polos.
q	q	Número de fases.
s	s	Deslizamiento entre la velocidad de la TMF y la velocidad del rotor.
$s_{Fr}(t)$		Deslizamiento instantáneo en función del tiempo.
$s_{Fr}^n(t)$	St	Deslizamiento instantáneo en función del tiempo normalizado.
$Sw_{Fr}^n(f)$		Amplitud del deslizamiento normalizado($s_{Fr}^n(t)$) en el dominio de la frecuencia.
T	T	Tipo de bobinado.
	velocidad	Vector de apoyo usado para corregir la señal de velocidad.
w_g	Canal[4]	Velocidad instantánea de giro del rotor.

w_t	Wt	Velocidad de giro de la TMF.
w_F^p	Wp	Espectro de la velocidad de giro de la TMF.
w_e		Pulsación de la red de alimentación
w_{FA-V}^{pn}		Velocidad de giro de la TMF normalizada para la técnica A-V.

Capítulo 1

Introducción

El motor de inducción es el tipo de motor más usado, se ha extendido gracias a su robustez y a su sencillez de diseño, construcción y reparación. Dada la profusión que tiene dentro de los diferentes sectores industriales, esta máquina se ha convertido en una de las de mayor relevancia desde el punto de vista del mantenimiento ya que el correcto funcionamiento de gran número de instalaciones va a depender de ellas. Como consecuencia de esta trascendencia se realizan grandes esfuerzos en el estudio de los defectos que se pueden presentar en este tipo de motores, y en la forma de poder evitar su fallo. En este último aspecto se trabaja fundamentalmente en aquellas técnicas y métodos que permitan detectar, diagnosticar e incluso pronosticar los posibles problemas que durante el funcionamiento de la máquina puedan aparecer.

1.1. Antecedentes.

Siguiendo las líneas de investigación sobre gestión de mantenimiento industrial, monitorización y diagnóstico de equipos dinámicos emprendida por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica de Cartagena, se realizó la tesis doctoral [8] en el año 2010 con título “*Estudio de anomalías en motores de inducción: modelización de defectos, análisis de técnicas de verificación avanzadas y desarrollo de nuevos métodos de diagnóstico*”, donde los nuevos métodos de diagnóstico basados en la medición de las intensidades que aparecen en

esta tesis, es uno de los principales puntos que estudia este proyecto. Posteriormente se estudiaron dos equipos comerciales en el proyecto fin de carrera [9] en el año 2012 de título “*Estudio sobre la eficacia de dos sistemas comerciales de verificación de defectos basados en el análisis de tensiones e intensidades. Aplicación sobre un equipo motobomba*” tras este proyecto se quedó el camino abierto para estudiar, no solo los métodos de diagnóstico propuestos en la tesis, sino tener un punto de comparación de efectividad con estos equipos comerciales.

1.2. Objetivos.

El objetivo principal del proyecto es la validación de los métodos de diagnóstico desarrollados en la tesis de la bibliografía [8]. Para cumplir éste se han marcado varios objetivos secundarios:

- Desarrollar una herramienta software que permita medir parámetros eléctricos y mecánicos de forma simultánea utilizando una tarjeta de adquisición.
- Implementación de los algoritmos que definen los métodos a validar en la herramienta software.
- Ensayar un motor bajo distintos tipos de fallo para comprobar el correcto funcionamiento de los métodos de diagnóstico programados.
- Comparar la efectividad de los nuevos métodos de diagnóstico utilizados con un sistema comercial que realice esa misma función.

1.3. Metodología de estudio.

Para conseguir los objetivos planteados, el desarrollo del presente proyecto comienza con el estudio de los métodos de diagnóstico propuestos en la tesis [8]. A partir de este estudio se plantea la herramienta informática a realizar y el hardware que se va a necesitar.

Para todos los indicadores que se van a obtener con el software creado se va a necesitar el valor instantáneo de la intensidad en las tres fases del motor, y para algunos indicadores, dependiendo de la técnica con la que se obtenga, se necesita además la velocidad instantánea de rotación del eje del motor.

La herramienta de software se diseña en el entorno de desarrollo *Delphi*, sabiendo esto, y una vez acotado el hardware necesario para la captación de las intensidades y la velocidad, se estudia la comunicación entre la tarjeta de adquisición y la herramienta informática a realizar.

Conseguida la comunicación se comienza con la creación del programa en dos fases, obtención de la señal y procesado de la señal hasta la obtención de los indicadores. Esta última parte se realiza siguiendo he interpretando la tesis para conseguir obtener los parámetros buscados.

Con la herramienta de software terminada se pasa a realizar ensayos con el equipo motobomba, este se encuentra instalado en el laboratorio de verificación mecánica del Departamento de Ingeniería Mecánica situado en la segunda planta del edificio Hospital de la Marina de la Universidad Politécnica de Cartagena. En este equipo se estudió también el comportamiento de dos sistemas comerciales para la detección de defectos (proyecto final de carrera [9]).

Tras la comprobación del perfecto funcionamiento de los equipos de medida se realizan los distintos ensayos experimentales sometiendo al equipo moto-bomba a distintos defectos, como se expone en el cuarto capítulo.

Tras la realización de estos ensayos, tanto el nuevo sistema de análisis de fallos como el análisis obtenido del sistema One-Pro son comparados, utilizando este último para poder tener una referencia sobre la efectividad del nuevo sistema de análisis puesto a prueba en este proyecto.

Capítulo 2

Base teórica

2.1. Tratamiento de los datos

Como se ha comentado anteriormente, este proyecto se encuentra fundamentado en las técnicas de verificación avanzadas y los nuevos métodos de diagnóstico desarrollados en la tesis [8], y en particular a las técnicas basadas en el fasor espacial de la tensión magnética en el entrehierro, expuestos en la sección 5.2. Estas técnicas se fundamentan en la idea de que los principales defectos que aparecen en los motores de inducción producen de una u otra manera una distorsión de las condiciones de generación o de propagación del campo magnético de la máquina. De esta manera, las magnitudes que están relacionadas con este campo se verán afectadas de forma directa por los defectos. Este es el caso de la tensión magnética del entrehierro, cuyo valor es fácilmente calculable a partir de las corrientes de alimentación del motor según el modelo que se presenta en la tesis.

En la figura 2.1 se representa en el espacio angular del motor, el fasor de tensión magnética para tres instantes de tiempo diferentes. Se observa como la onda se va desplazando angularmente en el espacio conforme avanza el tiempo.

Si se le realiza a este el espectro espacial del fasor, se obtienen los sucesivos armónicos espaciales de la tensión magnética. Representando estos espectros en amplitud a lo largo del

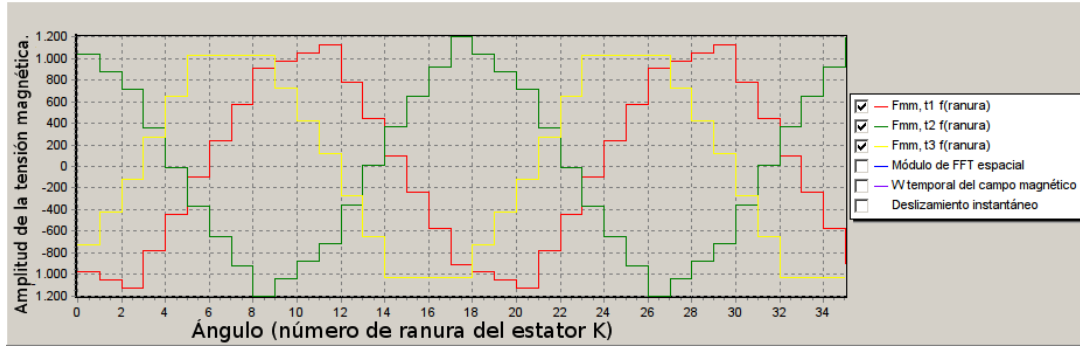


Figura 2.1: Amplitud de la tensión magnética en el entrehierro del motor que se ha llevado ha ensayo en función de la ranura del estátor para tres instantes de tiempo distintos.

tiempo se logra un mapa espectral de los armónicos espaciales de la tensión magnética con el tiempo. En la figura 2.2 se muestra este mapa espectral para uno de los motores ensayados. El armónico fundamental es el que coincide con el número de pares de polos del motor, y como se verá a continuación, en el procesado es con el único valor que nos quedamos del mapa espectral.

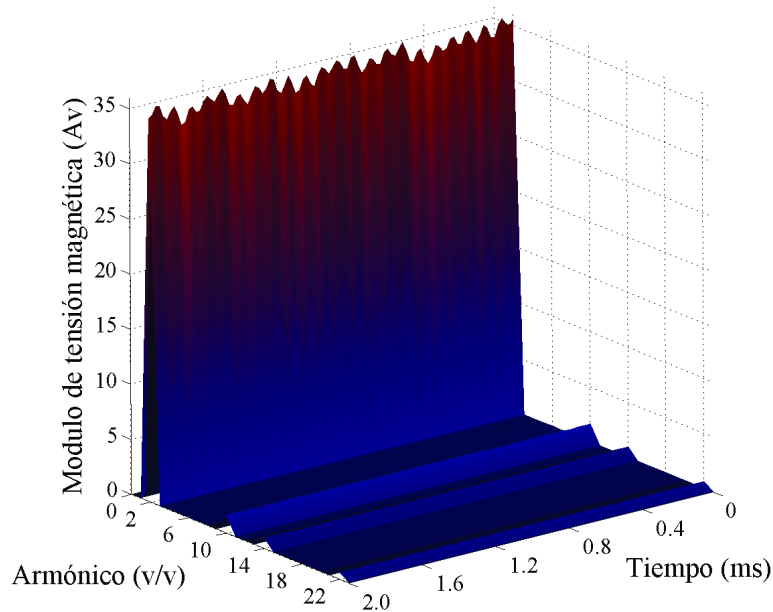


Figura 2.2: Mapa espectral del módulo de la tensión magnética de entrehierro para un motor de 4,6 kW, con 2 pares de polos y un correcto estado funcional.

El procesado de la señal utilizado es el expuesto en el diagrama de la figura 2.3, en esta técnica se calcula inicialmente el fasor de tensión magnética de entrehierro ($\vec{F}_{\theta,t}$) a partir de las co-

rrientes de todas las fases que alimentan al motor (en un sistema trifásico: $i_R(t)$, $i_S(t)$ e $i_T(t)$). En este cálculo se utiliza la *Función de distribución de corriente* (f_I) compuesta de la *Función de bobinado* (f_B), con estas funciones se obtiene el *vector de distribución de corriente* (\vec{I}_d). Por último empleando la *función fmm* f_{fmm} , se obtiene, a partir del vector de corriente, el *fasor de la tensión magnética de entrehierro* ($\vec{F}_{\theta,t}$), y a partir de este se determina el valor de su *componente espacial fundamental* (\vec{F}_t^p), a esta componente la denominaremos a partir de ahora como tensión magnética fundamental o TMF. Para la aplicación de estas funciones es necesario el conocimiento de ciertos parámetros constructivos del devanado del motor que pueden ser facilitados por el fabricante: Tipo de bobinado (T), número de ranuras del estátor (K), número de pares de polos (p), número de fases (q) y número de capas (C).

En el siguiente esquema se muestra todo el procesado de la señal propuesto en la tesis, hasta la obtención de tres parámetros básicos que pueden utilizarse para la indicación de defectos: el módulo del espectro completo de la TMF (F_{w-full}^p), el espectro del módulo de la TMF (F_w^p) y el espectro de la velocidad de giro de la TMF (w_F^p).

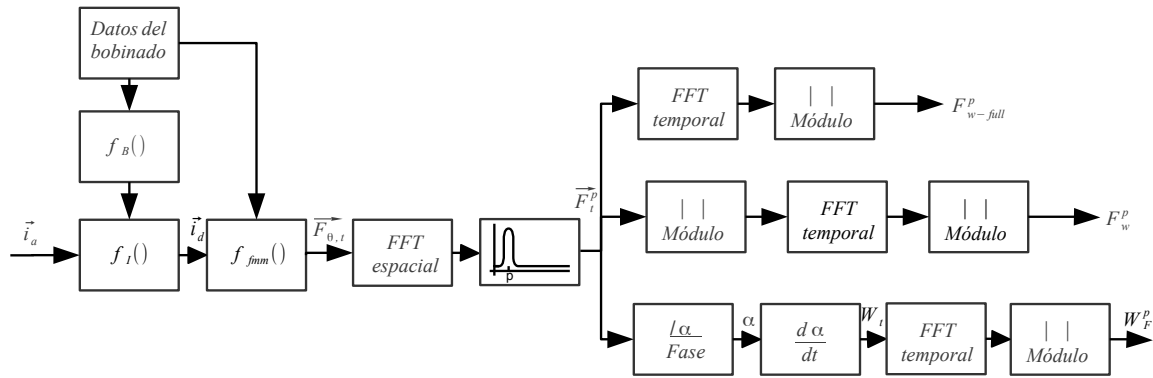


Figura 2.3: Diagrama de bloques para el tratamiento de datos, con los bloques necesarios para el cálculo del fasor de tensión magnética y de las señales basadas en éste, y utilizadas en las diferentes técnicas propuestas posteriormente.

En un motor ideal la TMF tendrá un modulo constante y una fase que aumentará a lo largo del tiempo proporcionalmente a la frecuencia de la corriente de alimentación. Ahora bien, como consecuencia de las asimetrías constructivas y de los defectos existentes en el motor aparecerán tanto en su módulo como en su fase cambios significativos en su comportamiento.

Este parámetro fasorial tiene la ventaja respecto del vector de las corrientes de alimentación, que en su medida se han tenido en cuenta las características del devanado y por lo tanto su valor puede considerarse independiente de estas.

Ademas de este tratamiento de datos hay que considerar en paralelo la medida de la velocidad angular instantánea, la cual se utiliza para la obtención de ciertos indicadores y es de utilización directa una vez obtenida.

2.2. Estudio del espectro frecuencial de la TMF.

Esta técnica consiste en estudiar la amplitud de las componentes frecuenciales del espectro temporal de la TMF, obtenidas en el apartado anterior.

Para normalizar las componentes del espectro completo de la TMF F_{w-full}^p , se dividen sus amplitudes absolutas por el valor de la componente fundamental, cuya frecuencia será la de red (f_e):

$$F_{w-full}^{pn} = \frac{F_{w-full}^p}{F_{fe}^p} \quad (2.1)$$

Por otro lado, para normalizar el espectro del módulo de la TMF se dividen sus componentes por el valor medio del módulo de la tensión magnética, es decir, por la amplitud de la componente a frecuencia cero:

$$F^{pn} = \frac{F_w^p}{F_w^p} \quad (2.2)$$

Según las conclusiones obtenidas en la tesis, cada uno de los defectos estudiados produce un patrón característico en estos espectros. A continuación se exponen los diferentes indicadores que sirven para el diagnóstico y seguimiento de la severidad de los diferentes defectos estudiados.

2.2.1. Excentricidad:

Según los resultados obtenidos mediante el modelo de motor implementado con excentricidad estática este defecto genera en el espectro completo de la TMF fundamentalmente las componentes:

- Las bandas laterales $f_e \pm k f_g$ (donde k son los primeros números naturales), los valores de estas bandas parecen aumentar parabólicamente con la excentricidad.
- Las bandas laterales $-f_e \pm k f_g$.
- La componente $-f_e$ que varía según el modelo de forma exponencial con el defecto. Esta última línea espectral también presenta sensibilidad muy elevada al desequilibrio eléctrico por lo que no se recomienda utilizarla de forma aislada como indicador de este tipo de fallo.

Por otro lado, en el espectro del módulo de la TMF, el defecto crea un aumento de la componente f_g y de sus primeros armónicos. La dependencia de la amplitud de esta componente con el grado de defecto parece ser de tipo parabólico.

La amplitud normalizada de estas componentes son dependientes del régimen de carga, pero su sensibilidad es pequeña.

Para la excentricidad dinámica aparecen en los espectros de la TMF las mismas bandas comentadas para la excentricidad estática. Para este tipo de excentricidad parece existir una relación entre la severidad del defecto y la componente $-2f_e + ps$. Esta línea espectral no parece estar relacionada con la excentricidad estática.

De esta forma, dado que existen múltiples bandas que se ven alteradas por el defecto de excentricidad, se proponen varios indicadores de fallo.

Para que los valores dados con los indicadores sean proporcionales al grado de excentricidad, se utilizan las raíces cuadradas de la amplitudes de las componentes $f_e \pm f_g$ del espectro

completo de la TMF en la ecuación 2.3, la componentes f_g del espectro del módulo de la TMF en la ecuación 2.4 y las componentes $-f_e \pm f_g$ del espectro completo de la TMF en la ecuación 2.5.

$$I_{ETMF}^{e1} = \sqrt{\frac{F_{w-full}^{pn}(f_e - f_g) + F_{w-full}^{pn}(f_e + f_g)}{2}} \quad (2.3)$$

$$I_{ETMF}^{e2} = \sqrt{F_{pn}(f_g)} \quad (2.4)$$

$$I_{ETMF}^{e3} = \sqrt{\frac{F_{w-full}^{pn}(-f_e - f_g) + F_{w-full}^{pn}(-f_e + f_g)}{2}} \quad (2.5)$$

Aunque todos estos indicadores se ven alterados con las excentricidades del rotor, según el modelo los indicadores I_{ETMF}^{e1} e I_{ETMF}^{e2} parecen ser más sensibles y robustos a la excentricidad estática mientras que I_{ETMF}^{e3} está mas relacionado con la excentricidad dinámica.

2.2.2. Defectos en los rodamientos:

Las frecuencias que se proponen para obtener las frecuencias características de los defectos puntuales en rodamientos son: para el defecto puntual en pista exterior la ecuación 2.6, para el defecto puntual en pista interior la ecuación 2.7 y para el defecto en el elemento rodante la ecuación 2.8.

$$f_{dpe} = \frac{f_g N_b}{2} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos(\eta) \right) \quad (2.6)$$

$$f_{dpi} = \frac{f_g N_b}{2} \left(1 + \frac{d_b}{d_m} \cos(\eta) \right) \quad (2.7)$$

$$f_{db} = \frac{f_g d_m}{d_b \cos(\eta)} \left(1 - \left(\frac{d_b}{d_m} \cos(\eta) \right)^2 \right) \quad (2.8)$$

La variable η es el ángulo de contacto de los elementos del rodamiento sobre las pistas, que para la mayoría de motores y formas de funcionamiento suele ser prácticamente 0. En el modelo se comprobó que las vibraciones que aparecen entre rotor y estátor de un motor eléctrico generan en el campo magnético componentes frecuenciales relacionadas en frecuencia y amplitud, y que estos defectos se apreciarán con mayor claridad en las frecuencias $-f_e - f_{pe}$ para el defecto en pista exterior y $f_e + f_{pi}$ para el defecto en pista interior, cuyos indicadores se presentan en las ecuaciones 2.9 y 2.10 respectivamente. En el caso de la lesión en elemento rodante no se ha llegado a detectar ninguna de las frecuencias relacionadas con el defecto, por lo que no se presenta indicador para este defecto.

$$I_{ETMF}^{pe} = F_{w-full}^{pn}(-f_e - f_{pe}) \quad (2.9)$$

$$I_{ETMF}^{pi} = F_{w-full}^{pn}(f_e + f_{pi}) \quad (2.10)$$

2.2.3. Asimetría rotórica:

La rotura de barras o anillos de cortocircuito del rotor produce una respuesta en el espectro completo de tensión magnética F_{w-full}^{pn} que se caracteriza por dos patrones característicos:

- Por un lado aparecen bandas laterales en torno a la frecuencia f_e con una separación $2sf_e$. Estas componentes aumentan de amplitud con la severidad del defecto. Además, su valor también se ve afectado por la carga a la que esté sometido el motor; a mayor par resistente mayor amplitud.

- Por otro lado, se ha observado mediante el modelo creado, y se ha comprobado mediante ensayo, que en la parte negativa del espectro aparece una consecuencia de la asimetría rotórica una serie de componentes cuya amplitud es dependiente de la severidad del defecto. Estas componentes son a frecuencia $(-2 \pm Ks)f_e$, siendo k un número natural. El autor de la tesis no encuentra constancia de que esta componente haya sido identificada en otro estudio.

Se observa que los valores de estas componentes frecuenciales muestran el grado de defecto, pero su valor tiene una gran sensibilidad frente a la carga, para paliar este problema se propone el indicador de la ecuación 2.11 que es menos sensible a los cambios en la carga.

$$I_{ETMF}^a = \frac{F^{pn}(2sf_e) + F_{w-full}^{pn}(-2f_e + sf_e)}{\sqrt{s}} \quad (2.11)$$

Donde s es el deslizamiento entre la velocidad de la TMF y la velocidad del rotor, y se expresa como:

$$s = \frac{\bar{w}_F^p/p - f_g}{\bar{w}_F^p/p}$$

2.2.4. Pérdida de aislamiento:

La pérdida de aislamiento produce inicialmente una progresiva circulación de corriente entre espiras adyacentes, estos cortocircuitos entre espiras en una bobina del devanado generan en la TMF una modulación temporal con frecuencia $2f_e$. Por otro lado, un desequilibrio eléctrico entre las fases del motor produce sobre la TMF un aumento principalmente de la componente f_e de su espectro frecuencial, pero también del armónico $2f_e$. Por este motivo utilizando los dos valores se puede discriminar entre un problema de desequilibrio eléctrico y otro de pérdida de aislamiento. Quedando totalmente definido este indicador en la ecuación 2.12.

$$I_{ETMF}^{pa} = (F^{pn}(2f_e) - F^{pn}(f_e)) \left(\frac{w_e - w_F^p(2f_e) + w_F^p(f_e)}{w_e} \right) \quad (2.12)$$

Donde w_e es la pulsación de la red de alimentación, es decir la frecuencia de red dividido entre el número de pares de polos (f_e/p). En el caso de que el valor del indicador sea menor que 0, el problema predominante es un desequilibrio eléctrico.

2.3. Relación entre la amplitud y la velocidad de giro de la TMF

Esta técnica consiste en analizar de forma conjunta los valores que alcanza la amplitud de una componente concreta del espectro del módulo de la TMF (F_w^p) y que está relacionada con un defecto, y la amplitud de la misma componente para el espectro de la velocidad de giro (o de cambio de fase) de la TMF (w_F^p). Este método de diagnóstico solo ha sido estudiado para el defecto de asimetría rotórica. Se ha comprobado que cuando se aproduce este tipo de anomalía aparece tanto en el espectro del módulo de la TMF como en el espectro de la velocidad de giro de la TMF la componente $2sf_e$, el cual aumenta con el grado de avería. Se observa que mientras $F_w^p(2sf_e)$ disminuye con la carga, el valor de la $w_F^p(2sf_e)$ aumenta.

Normalizando mediante las expresiones 2.13 y 2.14, entre ambos valores existe, para una misma severidad de asimetría una proporcionalidad inversa con la carga y a priori, con las características del motor.

$$F_{A-V}^{pn} = \frac{F_w^p(2sf_e) \cdot 2^{p-1}}{s|F_w^p|} \quad (2.13)$$

$$w_{F_{A-V}}^{pn} = \frac{w_F^p(2sf_e)}{s \cdot p!} \quad (2.14)$$

El indicador propuesto en esta técnica para el defecto de asimetría rotórica es el de la ecuación 2.15.

$$I_{A-V}^a = w_{F_{A-V}}^{pn} + M \cdot F_{A-V}^{pn} \quad (2.15)$$

Donde M es un parámetro prácticamente constante cuyo valor para los casos estudiados en la tesis es de 1, 5.

De los estudios realizados se obtiene que los valores límite del indicador I_{A-V}^a para barras consecutivas fracturadas vienen dados por:

$$I_{A-V}^a \approx \begin{cases} \frac{40.3}{n} & \text{Límite entre 0 y 1 barra fracturada.} \\ \frac{40.4}{n} & \text{Límite entre 1 y 2 barras fracturadas.} \\ \frac{40.5}{n} & \text{Límite entre 2 y 3 barras fracturadas.} \end{cases} \quad (2.16)$$

Donde n es el número de barras del rotor. En la tesis hay expuesto un modelo gráfico que sería interesante implementar en el programa mas adelante.

2.4. Orbital de la TMF

Esta técnica consiste en en un diagrama polar la evolución de la amplitud y fase de la TMF a lo largo del tiempo.

Para representar este orbital se parte de la señal F_w^p a la que se le aplica un filtrado para quitar las frecuencias que no son de interés. Posteriormente se vuelve a pasar la señal frecuencial al dominio del tiempo mediante la aplicación de la inversa de la FFT.

El módulo normalizado de esta señal temporal representará para cada instante la amplitud de cada punto del orbital. Para normalizar se resta y divide por el valor medio de F_w^p y se multiplica por 100 para pasar la medida a porcentaje. En la figura 2.4 se presenta de forma gráfica todo este proceso de cálculo.

El ángulo para cada valor de amplitud se puede calcular según interese de las tres formas diferentes mostradas en la figura 2.4, donde $w_g(t)$ es la velocidad de giro del rotor, y $w_t(t)$ es la velocidad de giro de la TMF. Cabe destacar que en el caso c) se considera en el caso expuesto

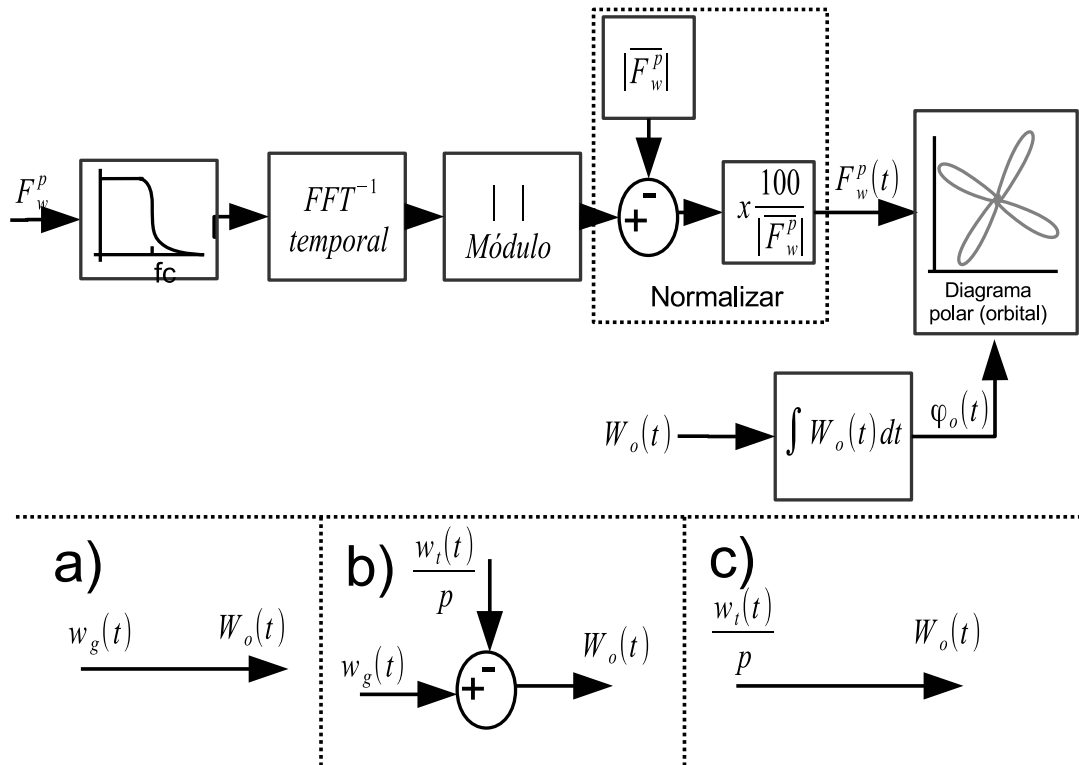


Figura 2.4: Diagrama de bloques en el que se representa el proceso de cálculo del orbital de la componente fundamental de la tensión magnética en el entrehierro. En la parte inferior se presentan tres formas de obtener el ángulo para cada instante de tiempo: a) suponiendo que los valores de la tensión llevan una velocidad angular igual a la del rotor, b) suponiendo que los valores de la tensión llevan una velocidad angular igual al deslizamiento absoluto y c) suponiendo que el sistema de referencia no gira. Cada una de ellas se utilizará según interese para caracterizar un defecto u otro.

en la tesis w_t , tras la experimentación en este proyecto se observa que este valor es mas claro partido de los pares de polos.

Para obtener la gráfica del orbital se representa $\varphi_o(t)$ como el ángulo, frente al $F_w^p(t)$ que representa la amplitud en el diagrama polar.

En esta técnica el indicador del defecto será la forma y amplitud del orbital representado. A continuación se describen los patrones de comportamiento de este orbital para cada uno de los defectos estudiados en la tesis.

2.4.1. Excentricidad:

Para caracterizar este defecto se utiliza el orbital calculado según el algoritmo presentado en la figura 2.4, opción a), es decir, el ángulo de cada punto del orbital se obtiene por integración de la velocidad de giro del rotor $w_g(t)$.

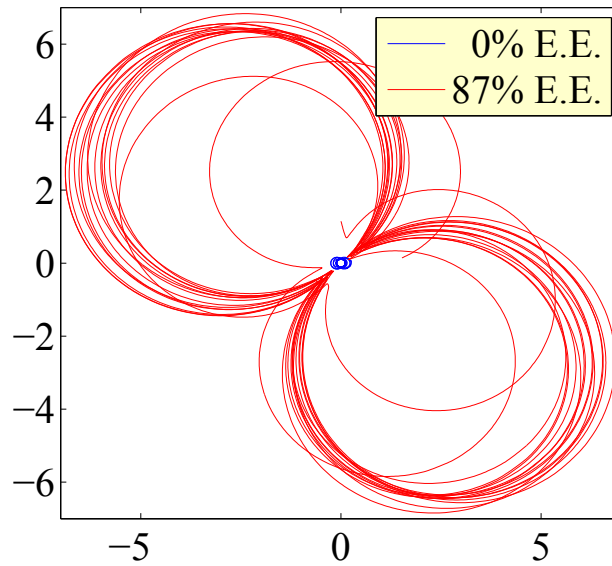


Figura 2.5: Representación de un orbital normal y otro con excentricidad estática de 87 %, para un motor de inducción. Este orbital ha sido obtenido mediante el modelo de motor de inducción presentado en la tesis configurado para 3 kW, 4 pares de polos y 20 Nm de carga.

En la figura 2.5 se representa el orbital para un mismo motor sin excentricidad y con un grado elevado de excentricidad estática. Se observa que este defecto tiende a aumentar el orbital y a generar una forma semejante a dos anillos del mismo diámetro, unidos y desplazados casi la distancia de su diámetro. Se comprueba que a mayor excentricidad la separación y diámetro de los anillos aumenta. Además la severidad del defecto hace que las sucesivas trayectorias del orbital dejen de ser coincidentes y formen un anillo más ancho.

Cuando existe excentricidad dinámica el orbital es similar al que se presenta con excentricidad estática. Cuando este tipo de excentricidad es muy severa los dos bucles característicos pueden desdoblarse y aparecer un tercer o cuarto anillo de menor tamaño.

No se analiza el comportamiento que tendría el orbital cuando existe *defectos en los rodamientos*.

2.4.2. Asimetría rotórica:

Este defecto se caracteriza según el algoritmo presentado en la figura 2.4 en el apartado b), es decir, el ángulo para cada punto del orbital se obtiene por la integración del deslizamiento absoluto del rotor respecto del campo magnético.

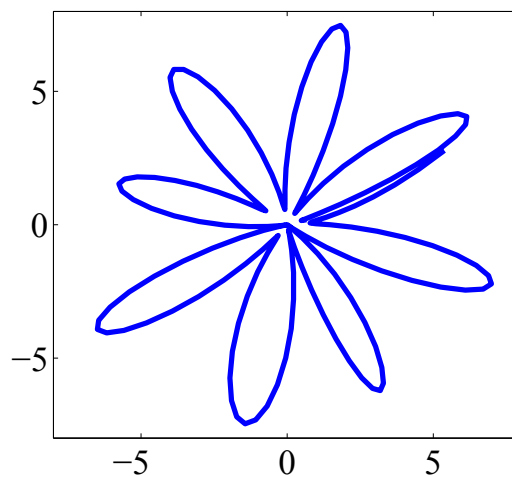


Figura 2.6: Orbital característico para un motor de inducción de 4 pares de polos y con asimetría rotórica. Este orbital ha sido obtenido mediante el modelo de motor de inducción presentado en el la tesis y configurado con 4 pares de polos, 31 Nm de carga, 44 barras en el rotor de las cuales 3 están totalmente fracturadas.

Cuando en el motor existe un defecto de asimetría rotórica, en el orbital aparecen tantos lóbulos como número de polos tiene el motor. La asimetría convierte un orbital caótico, en un orbital con forma de flor, con tantos pétalos como polos.

Conforme aumenta la asimetría los pétalos de la flor se definen más claramente y crecen de tamaño como se aprecia en la figura 2.6:

2.4.3. Pérdida de aislamiento:

Este defecto se caracteriza según el algoritmo presentado en la figura 2.4 en el apartado c), es decir, el ángulo para cada punto del orbital se obtiene por la integración de la velocidad de giro de la componente espacial del fasor de tensión magnética dividida entre el número de pares de polos.

Cuando se produce una pérdida de aislamiento y aparece un cortocircuito entre espiras de una misma bobina, el orbital adquiere una forma de flor con 4 pétalos ovalados que crecen conforme aumenta el grado de avería. En la figura 2.7 se muestra la forma que adquiere el orbital como consecuencia de una pérdida de aislamiento.

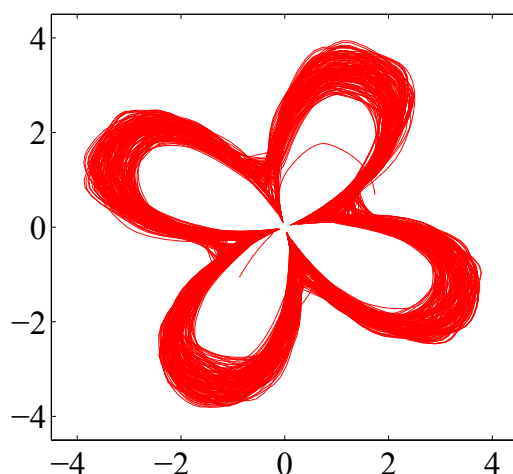


Figura 2.7: Orbital característico para un motor de inducción de 4 pares de polos con pérdida de aislamiento. Este orbital ha sido obtenido mediante el modelo de motor de inducción presentado en la tesis, con 4 espiras cortocircuitadas y configurado para 3 kW, 4 pares de polos y 32 Nm de carga.

2.5. Deslizamiento instantáneo entre la tensión magnética y el rotor.

Se calcula el deslizamiento instantáneo que existe entre las velocidades de giro del rotor y el de la TMF. La velocidad instantánea de giro del rotor se obtiene mediante el sistema de medida

que se explica en el capítulo del anexo B.2 de la página 82, donde se obtiene los valores de la velocidad instantánea en función del ángulo. Por otro lado, la velocidad de giro del fisor de tensión magnética (W_t) se obtiene como se explica en la sección de tratamiento de datos 2.1 de la página 5. En este caso, puesto que las variables de ángulo, de tiempo y de velocidad son discretas, la transformación se realiza tal y como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 2.3 donde se obtiene el deslizamiento instantáneo en función del tiempo por medio de la expresión 2.17. En la ya mencionada tesis [8] también se puede encontrar la forma de hallar esta expresión si tenemos los datos en función del ángulo.

$$s_{Fr}(t) = \frac{w_t(t) - p \cdot w_g(t)}{\overline{w_t}} \quad (2.17)$$

Para normalizar la medida del deslizamiento e intentar hacer este parámetro lo más independiente posible de la carga, velocidad y momento de inercia del árbol de ejes, se divide el valor obtenido de la ecuación 2.17 por su media y se multiplica por 100 para dar el resultado en porcentaje como se muestra en la ecuación 2.18.

$$s_{Fr}^n(t) = \frac{s_{Fr}(t)}{\overline{s_{Fr}}} \cdot 100 \quad (2.18)$$

Para obtener los diferentes indicadores de defecto se realiza la transformación de la señal de deslizamiento al dominio de la frecuencia mediante la FFT. Se denomina como $Sw_{Fr}^n(f)$ a la componente de frecuencia f del espectro de amplitudes del deslizamiento normalizado. A continuación se describen los indicadores para cada una de las averías estudiadas.

2.5.1. Excentricidad:

Cuando existe excentricidad en el motor, ya sea estática o dinámica, se produce en el deslizamiento instantáneo entre la tensión magnética y el rotor una serie de cambios que son propios de este defecto. La marca más significativa de este tipo de defecto son las oscilaciones en la señal $s_{Fr}^n(t)$ a frecuencias $k \cdot f_g$ donde k son los números naturales.

En la figura 2.8 se puede observar la firma que deja la excentricidad, en este caso estática, sobre la señal Sw_{Fr}^n . En el caso de la excentricidad dinámica, la firma espectral es similar.

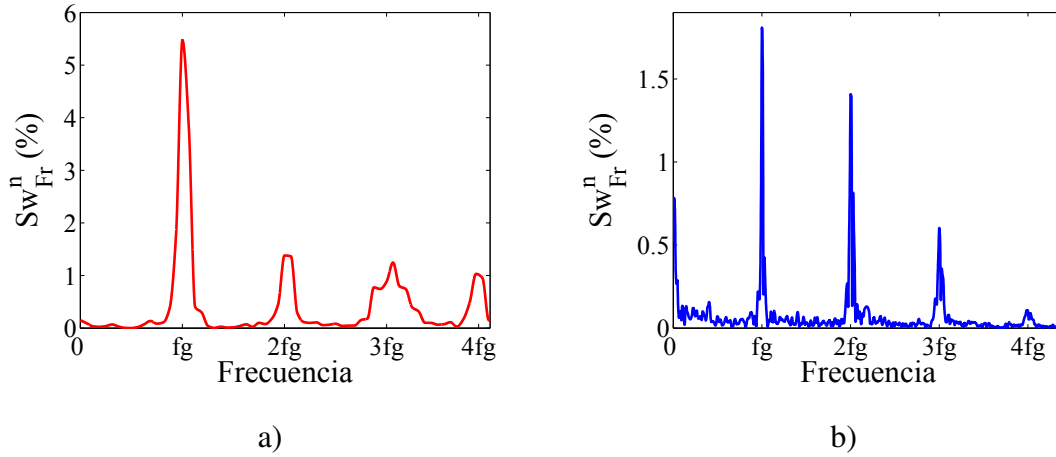


Figura 2.8: Patrón característico, en el espectro $Sw_{Fr}^n(f)$, de un defecto de excentricidad estática. a) Obtenido mediante el modelo de la tesis. b) Obtenido mediante ensayo para el motor AL-235, con 4 pares de polos, una carga de ≈ 2 Nm y una excentricidad estática de ≈ 87 %.

Como valor indicador del defecto de excentricidad se toma únicamente la componente f_g de Sw_{Fr}^n ya que es la componente más sensible al defecto; sus armónicos se atenúan de forma importante cuando la excentricidad es pequeña. Este indicador se designará como I_S^e . Su expresión se presenta en la ecuación 2.19.

$$I_S^e = Sw_{Fr}^n(f_g) \quad (2.19)$$

Como se indica en la tesis tras obtener resultados este indicador parece ser bastante insensible a los posibles cambios en el régimen de operación del motor. Pero a la hora de utilizarlo como herramienta de detección y diagnóstico se debe tener en cuenta que es bastante susceptible a las fluctuaciones de la carga durante una vuelta del rotor.

Para esta técnica tampoco se estudia el efecto en los fallos de rodamiento.

2.5.2. Asimetría rotórica:

En esta técnica se utiliza como indicador del defecto de asimetría el valor de la componente $2sf_e$ del espectro de amplitudes del deslizamiento normalizado. Aunque en el espectro también son características del defecto los primeros armónicos de esa componente. El indicador quedará por tanto definido según la expresión 2.19.

$$I_S^a = Sw_{Fr}^n(2sf_e) \quad (2.20)$$

En la figura 2.9 se puede observar un espectro patrón de este deslizamiento para un defecto de asimetría en el rotor; en este caso se ha obtenido mediante la modelización de un motor de 4 pares de polos en la que existe una asimetría en el rotor como consecuencia de la fractura de 2 de sus 44 barras.

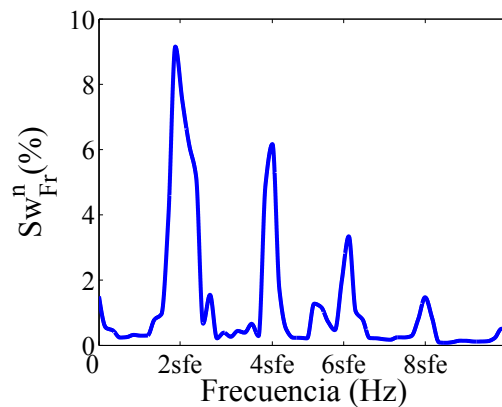


Figura 2.9: Espectro característico para un motor de inducción con asimetría rotórica y 4 pares de polos. Este orbital ha sido obtenido mediante el modelo de motor de inducción presentado en el capítulo 4 y configurado con 4 pares de polos, 31 Nm de carga, 44 barras en el rotor, de las cuales 2 están totalmente fracturadas.

2.5.3. Pérdida de aislamiento:

Se ha comprobado mediante la simulación con el modelo creado y por medios de los ensayos que cuando en el bobinado del estátor se produce un cortocircuito entre espiras, en el

deslizamiento instantáneo entre la tensión magnética y el rotor se genera una oscilación a frecuencia $2f_e$. Esta componente también es excitada cuando existe un desequilibrio eléctrico en la alimentación del motor, pero a diferencia de la pérdida de aislamiento, el desequilibrio eléctrico genera en el deslizamiento una oscilación de gran importancia a la frecuencia f_e . De esta forma, es posible detectar y distinguir estos dos defectos midiendo las amplitudes de la componentes f_e y $2f_e$ del espectro Sw_{Fr}^n .

En la figura 2.10 se pueden observar los espectros del deslizamiento, para un defecto de desequilibrio eléctrico producido por una caída de tensión en una de las fases de 2 voltios, junto con el captado para una pérdida de aislamiento generada por el cortocircuito de 4 espiras de una de las bobinas del estátor.

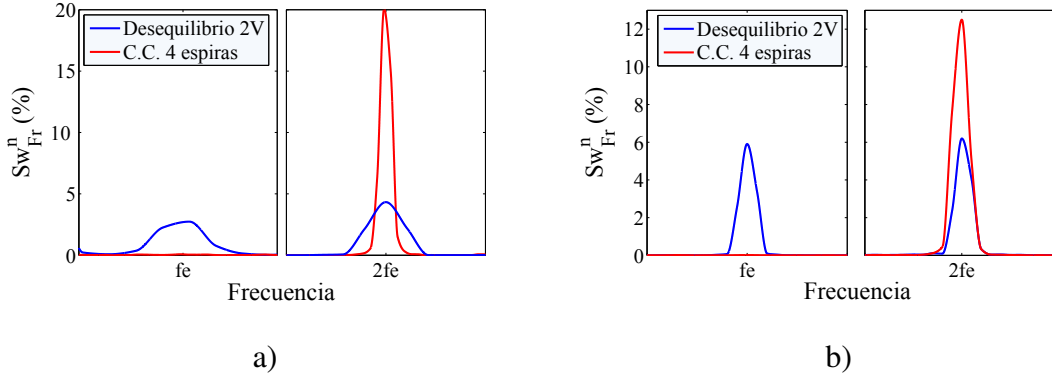


Figura 2.10: Comparación del Sw_{Fr}^n en las bandas de f_e y $2f_e$, entre un motor con un desequilibrio eléctrico de 2 voltios en una de sus fases y el mismo pero con 4 espiras cortocircuitadas. a) Obtenido mediante modelo, b) obtenido mediante ensayo con el motor AL-235, con 4 pares de polos y una carga de $\approx 32\text{Nm}$.

Para que el indicador del defecto de pérdida de aislamiento sea en la medida de lo posible insensible al desequilibrio eléctrico, se propone que se calcule mediante la resta de las amplitudes de las componentes $2f_e$ y f_e del espectro del deslizamiento instantáneo. Este indicador que se designará como I_S^{pa} queda definido según la expresión 2.21.

$$I_S^{pa} = Sw_{Fr}^n(2f_e) - Sw_{Fr}^n(f_e) \quad (2.21)$$

Este indicador aumentará su valor con el número de espiras cortocircuitadas en una bobina.

Capítulo 3

Desarrollo del programa

3.1. Introducción

Como se ha mencionado anteriormente este proyecto se basa en la comprobación de las técnicas de verificación fundamentadas en el fasor espacial de la tensión magnética en el entrehierro, propuestas en la ya citada tesis [8]. Para cumplir con este propósito, y comprobar de forma eficiente con el máximo número de ensayos, se decide realizar un programa que obtenga los indicadores automáticamente.

Este programa se realizará en el entorno de desarrollo *Delphi 7*, debido a que se consigue un programa final compilado que no necesita de interprete comercial, la eficiencia del programa final mejora a la vez que la herramienta desarrollada es lo suficientemente versátil y simple como para ser ejecutada en el hardware que se va a emplear, el cual es compatible con la tarjeta de adquisición.

El sistema de captación se encuentra descrito en el anexo B, particularmente en la sección B.1 de la página 81 para la captación de las tres intensidades del motor y en la sección B.2 de la página 82 para la captación de la velocidad instantánea, la lectura completa de este anexo nos muestra la interacción con el programa final.

En este capítulo nos centraremos principalmente en el funcionamiento del programa.

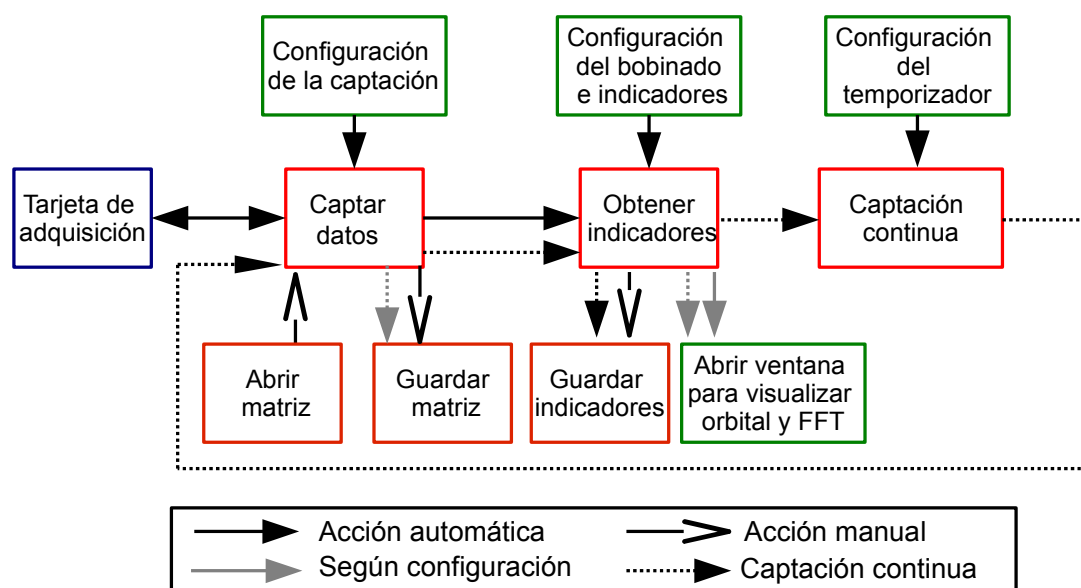


Figura 3.1: Diagrama de bloques sobre el funcionamiento del programa. Los bloques de perfil verdes son ventanas y los bloques de perfil rojo son las funciones principales que interactúan con los demás elementos del programa.

En la figura 3.1 se puede observar el diagrama de bloques sobre el funcionamiento del programa. Los bloques de perfil verde son ventanas, y los bloques de perfil rojo son las funciones principales que interactúan con el resto de elementos. Las distintas pestañas de la ventana de *configuración* se utilizan para definir las distintas funciones principales. La función de *captar datos* interactúa con la tarjeta de adquisición, además tiene la posibilidad de *guardar* o *abrir* los datos desde una matriz externa indicándole el fichero correspondiente, por otro lado la función de *obtener datos* manda los datos a la función de *obtener indicadores* la cual trabaja con estos datos y una vez realizadas todas las operaciones obtiene los indicadores finales que pueden ser guardados, además, si está configurado de este modo, se abrirán las ventanas donde se puede observar los *orbitales* y las *gráficas en el dominio de la frecuencia y del tiempo*. Por último hay que hacer hincapié en la *captación continua* que engloba no solo el bloque correspondiente, sino que guía el resto de funciones para ser ejecutadas de forma consecutiva (como muestra la línea de trazos), y de este modo realizar varias captaciones en los intervalos de tiempo marcados para poder realizar el estudio. A continuación se pasa a describir de forma más detallada el funcionamiento del sistema.

3.2. Captación de datos

La ventana principal representada en la figura 3.2 se centra en la captación de datos desde la tarjeta de adquisición y de representarlos gráficamente, para ello se ha incorporado un *TChart* a la izquierda para graficar los resultados y un *Memo* para seguir el proceso del programa en todo momento durante su ejecución, la zona de comentarios situada en la parte inferior se explicará en el apartado 3.5.

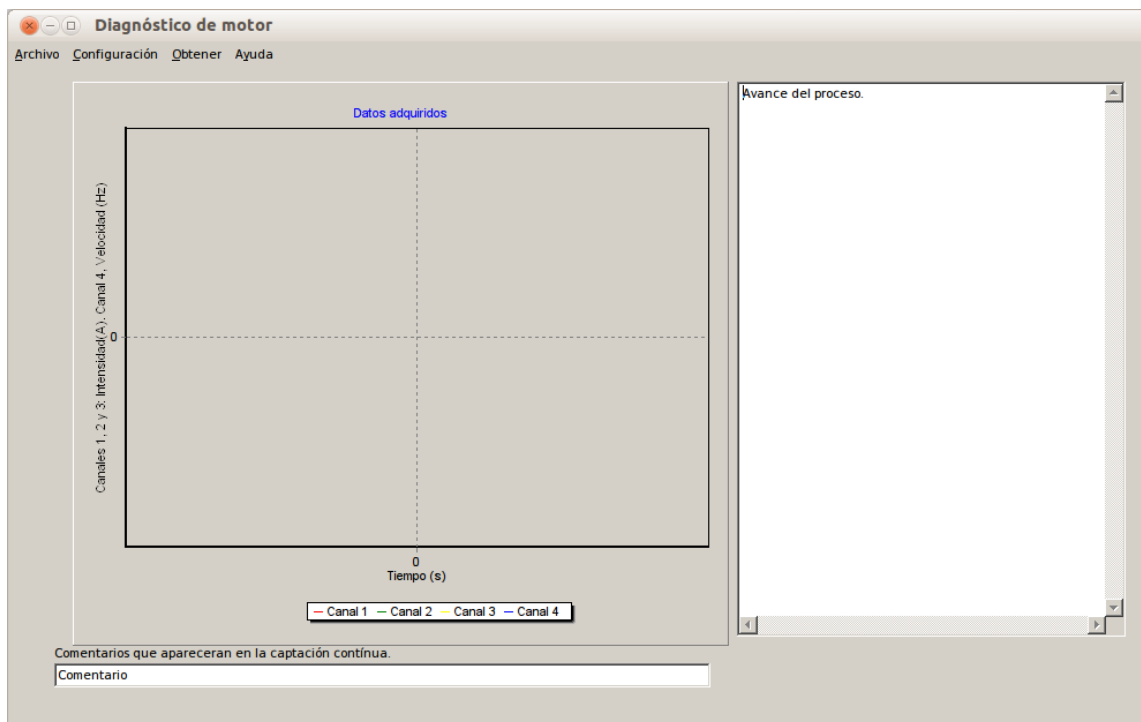


Figura 3.2: Ventana principal del programa.

En la parte superior tenemos un *MainMenu* (menú principal) desde donde accedemos a todas las opciones del programa.

3.2.1. Configuración de la captación

Para poder acceder a las opciones que nos brinda el programa sobre la captación tenemos que acceder a la pestaña *captación* de la ventana de *configuración*, esto se puede conseguir directamente desde la ventana principal, en el menú *Obtener* clicando sobre *Configuración de la captación* como se muestra en la figura 3.3.

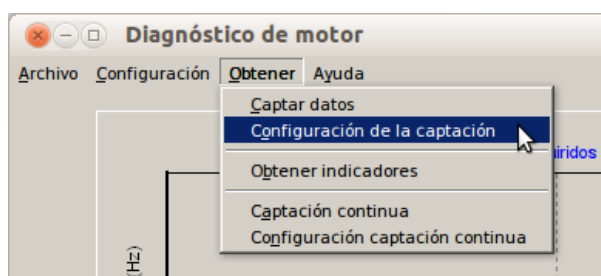


Figura 3.3: Abrir la ventana de *configuración* en la pestaña *Captación*

Esta opción nos abrirá directamente la ventana de *configuración* en la pestaña *captación* representada en la figura 3.4 donde se pueden configurar todos los datos relacionados con la captación.

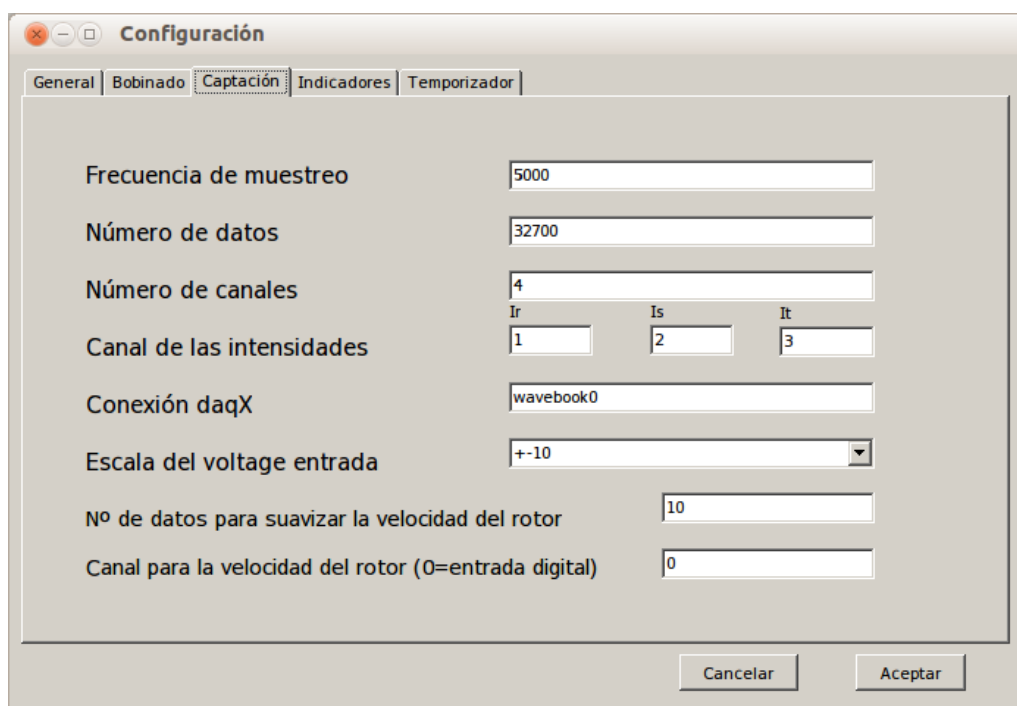


Figura 3.4: Ventana de *configuración* en la pestaña *Captación*

En esta pestaña se pueden configurar las características de los datos que se obtendrán para poder realizarles el posterior tratamiento. En la figura 3.4 se muestran los datos por defecto introducidos, los cuales intenta optimizar las especificaciones del equipo captador, y a la vez intentar obtener la máxima precisión posible en los indicadores a obtener. A continuación se comentan cada uno de los parámetros:

- La *frecuencia de muestreo* que viene en hercios y para maximizar el número de datos se mantiene en 5.000 Hz .
- El *número de datos* cuyo valor máximo es 32.768 datos (2^{15}) debido a que a partir de este número las librerías usadas para la transformada rápida de Fourier es incapaz de trabajar correctamente.
- El *número de canales* aunque al comienzo del proyecto se hizo variable, se estableció dejarlo estático en cuatro para aumentar el rendimiento a la hora del guardado de datos, no se ha eliminado el factor para futuras modificaciones del programa.
- En *Canal de las intensidades* se establece en que canal de la tarjeta de adquisición se va a conectar cada anillo referente a las distintas intensidades conectadas al motor (r, s y t).
- La *Conexión daqX* establece el nombre del dispositivo donde se ha configurado la tarjeta de adquisición en los drivers, para que la librería usada llame a ese dispositivo, en nuestro caso “wavebook0” como se explica en el capítulo B.3 de la página 84 del anexo.
- En *Escala del voltaje entrada* se establece el ancho de escala, que modifica la medida para calcular las intensidades. Para tener los valores correctos de intensidad, en nuestro caso tras varias pruebas, se debe establecer en ± 10 .
- Para intentar corregir los errores que introduce el encoder y el contador se utiliza aparte de varios algoritmos secundarios, una media móvil que lo que hace es suavizar los datos de entrada, en el apartado *Nº de datos para suavizar la velocidad del rotor* se establece el número de datos que se utiliza para realizar esta media móvil, el programa ya tiene en cuenta esta medida para tomar datos de más en la captación, y centrar las señales para que correspondan en el tiempo tanto las intensidades como la velocidad de giro del motor. Para saber más sobre este proceso acudir a la sección C.1 del anexo.
- La última entrada de esta pestaña es *Canal para la velocidad del rotor (0=entrada digital)* donde se establece en que canal de entrada de la tarjeta de adquisición se encuentra la entrada del encoder, en nuestro caso y debido a nuestro método de entrada a través del contador tiene que ser la entrada digital de la tarjeta de adquisición (*Canal 0*).

Tras configurar la captación de los datos y todos los parámetros ya estamos en condiciones de adquirir los datos.

3.2.2. Captación de los datos y visualización de los resultados

Para la Obtención de los datos hay que ir, en el menú de la ventana principal, en la pestaña *Obtener* y hacer click en el botón con la etiqueta *Captar datos*. Esto hará que el programa comience la captación interaccionando con la tarjeta de adquisición, tratando los datos de la velocidad posteriormente para eliminar en la medida de lo posible los errores y guardando todo esto en la matriz *Canal*. Este proceso se puede seguir en el *Memo* de la ventana principal, posteriormente se muestran *un número representativo* de los datos captados en cada canal (no se muestran todos para aumentar la eficiencia del programa) y posteriormente se grafica en el TChart (en la gráfica si que se encuentran todos los datos captados y que se encuentran en la matriz *canal*). Por último cierra la conexión con la tarjeta de adquisición y borra las variables locales como por ejemplo el buffer.

La matriz canal siempre se obtiene de la misma manera, aunque se cambie el orden en la entrada de la tarjeta de adquisición (siempre que se configure en la ventana de configuración). La matriz canal en orden por filas: I_r , I_s e I_t en Amperios, y la velocidad en el cuarto canal en hercios.

3.3. Guardado y apertura de los datos

El programa realizado cuenta con un sistema de guardado y apertura de datos desde el menú *Archivo* de la ventana principal como se muestra en la figura 3.5 Tanto el botón de *Guardar matriz* como el de *Abrir matriz* muestran las ventanas por defecto de windows para tal efecto.

El guardado se realiza en un archivo de texto de windows por defecto (.txt), facilitando de esta manera su exportación o su recuperación para otros programas si fuera necesario. Tanto al abrir como al guardar se muestra la ruta del archivo guardado en el título de la ventana principal

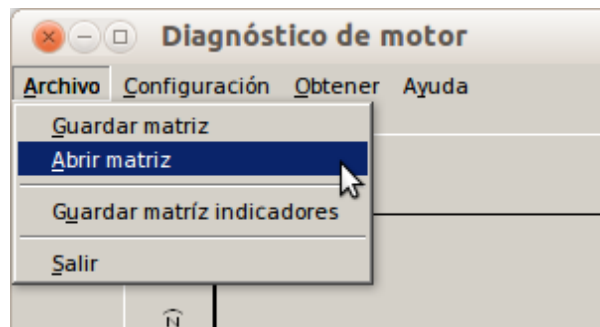


Figura 3.5: Apertura de los cuadros de dialogo de guardar y abrir un archivo de datos.

como se muestra en la figura 3.6. En esta figura también se observa ampliado el valor de las tres intensidades y de la velocidad (la cual tiene una clara ondulación como consecuencia de un error detallado en el anexo, capítulo B.4 de la página 87), para ampliar solo hay que hacer una ventana de izquierda a derecha dentro de la gráfica arrastrando con el puntero del ratón, y desplazar con el botón derecho del ratón (Para quitar el zoom solo hay que hacer una ventana de derecha a izquierda).

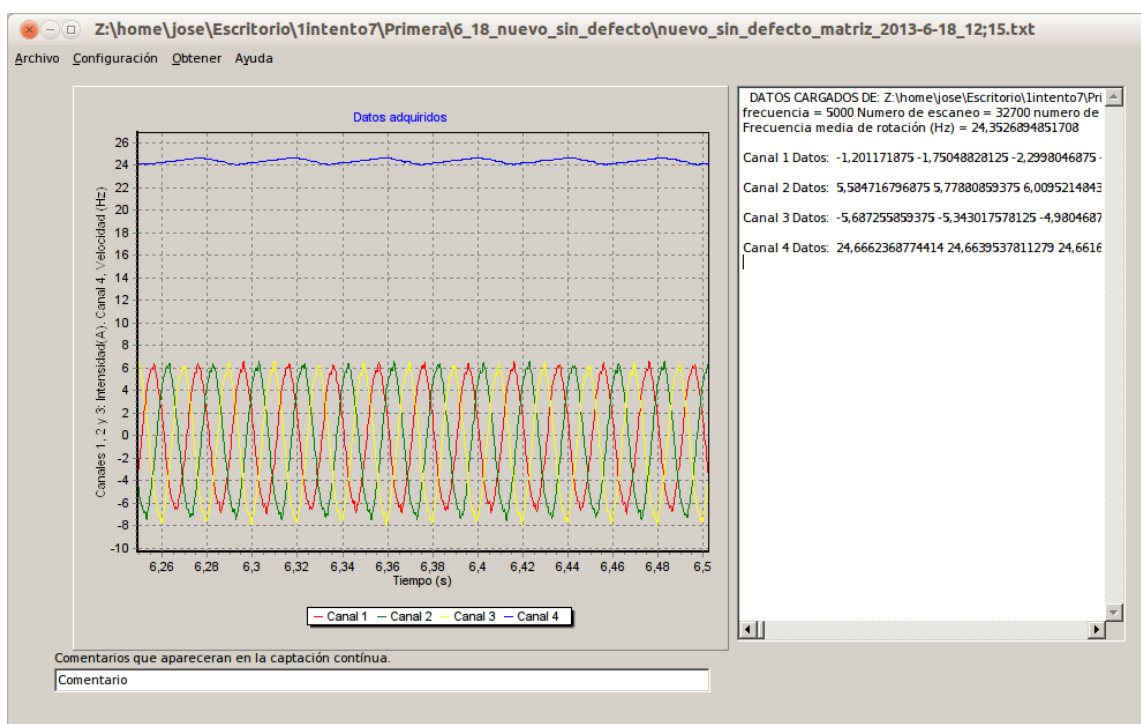


Figura 3.6: Muestra de una apertura de datos.

Los datos guardados por defecto por el programa son:

- La frecuencia de muestreo con la que se obtuvo la muestra (denominada en el archivo de texto como *frecuencia*).
- El número de datos con el que se realizó la toma de datos (denominado como *Numero de escaneos*).
- El número de canales con el que se realiza la muestra denominado en el archivo de texto como *numero de canales* (este dato no se usa actualmente ya que se fija en una constante en cuatro para aumentar la eficiencia del programa)
- La escala con la que se toma la muestra, se recomienda mantener este valor en 20 (± 10).
- Las intensidades I_r , I_s e I_t obtenidas, guardadas dentro de la matriz *Canal* y descargadas en el archivo de texto en *Canal 1*, *Canal 2* y *Canal 3* respectivamente, estos datos son números reales separados por “;”.
- La velocidad instantánea de giro que es la tercera fila de la matriz *Canal* y el *Canal 4* en el archivo de texto, estos datos al igual que las intensidades son números reales, en hercios y separados por “;”.

3.4. Obtención de los indicadores

Hasta ahora en este capítulo se ha hablado de los datos y su captación, ahora vamos a hablar del verdadero trabajo del programa hasta la obtención de los indicadores, comenzando con el tratamiento de los datos que se encuentra desarrollado en el apartado 2.1, donde aparte de los datos de la intensidad y la velocidad necesitamos ciertos datos constructivos de la bobina como se muestra en la figura 2.3.

3.4.1. Configuración del bobinado

Para entrar en la ventana de configuración a la pestaña de configuración del bobinado hay que entrar desde el menú de la ventana principal, en configuración y después bobinado como se muestra en la figura 3.7.

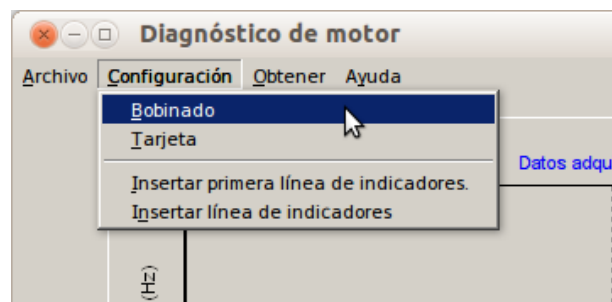


Figura 3.7: Abrir la ventana de configuración del bobinado

En la figura 3.8 se representa la ventana de configuración en la pestaña para introducir los datos que hacen falta para la realización de la *Tabla de conexiones de un bobinado estatórico o Matriz de conexiones (Bob)* y la *matriz del número de espigas por bobina (N)*,

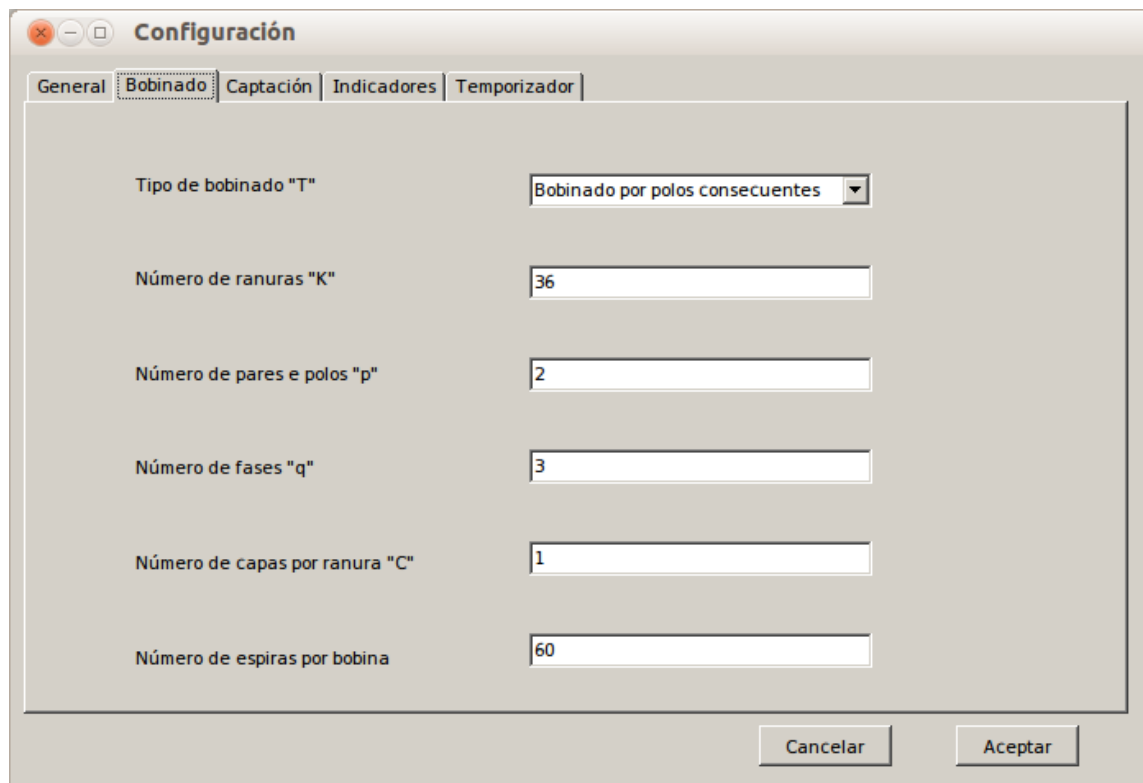


Figura 3.8: Ventana de configuración pestaña del bobinado.

Las características constructivas del bobinado y que hacen falta para completar esta pestaña de configuración son el *tipo de bobinado (T)*, el *número de ranuras (K)*, el *número de pares de polos(p)*, el *número de fases(q)*, el *número de capas por ranura (C)* y el *número de espiras por bobina*. En el tipo de bobinado se tendrán tres opciones de bobinado: bobinado por polos,

bobinado por polos consecuentes o excéntrico imbricado. El número de espiras por bobina se utiliza para la realización de la matriz del número de espiras por bobina, que aunque puede ser que varíe en un mismo motor de una bobina a otra, en este caso se tomará como constante en todas las bobinas.

Las matrices nombradas anteriormente son obtenidas directamente al pulsar sobre el botón *Aceptar* de esta ventana, si no se *Acepta* esta ventana para la creación de las matrices no se puede obtener los indicadores, y así esta programado. En la figura 3.9 se puede ver la representación que hace el programa de la *matriz de conexiones* una vez aceptada la ventana de configuración.

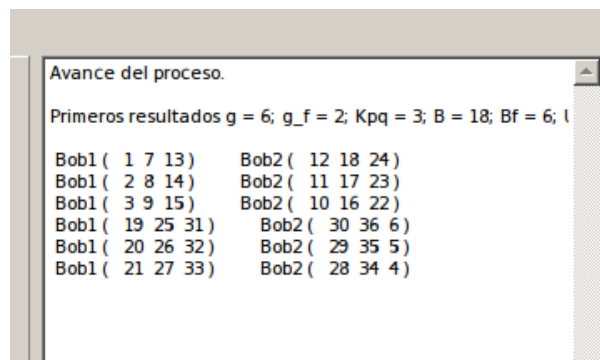


Figura 3.9: Muestra la *matriz de conexiones* del motor utilizado normalmente para la experimentación desde el propio programa.

La obtención de estas matrices a partir de los datos se encuentran desarrollados en la tesis de la bibliografía [8].

3.4.2. Configuración de los datos necesarios para la obtención de los indicadores

Hasta ahora se a hablado de los datos necesarios para hacer el tratamiento de los datos, ahora de los parámetros que se usan directamente para la obtención de los indicadores y que se usa después de obtener las matrices F_{w-full}^p , F_w^p , w_t y w_F^p , para conocer este proceso de cálculo acudir a la sección 2.1.

Estos parámetros se configuran en la *ventana de configuración* en la pestaña de *Indicadores* como se muestra en la figura 3.10.

Configuración

General | Bobinado | Captación | **Indicadores** | Temporizador

Frecuencia de la red (Hz)

Características de los rodamientos (mm):
 Diámetro medio Diámetro de los elementos rodantes
 Número de elementos rodantes

Parámetro M, Indicador de barras

Frecuencia de corte para orbital (Hz):
 Frecuencia baja Frecuencia alta

Número de barras del rotor

☒ Ver orbital ☒ Ver gráficas temporales

Cancelar Aceptar

Figura 3.10: Ventana de configuración de los parámetros necesarios para la obtención de los indicadores

Los parámetros a introducir son:

- La *frecuencia de red* (f_e) en hercios.
- Las *características de los rodamientos* en milímetros (el *Diámetro medio* (d_m), *Diámetro de los elementos rodantes* (d_b) y el *Número de elementos rodantes* (N_b)).
- El *Parámetro M, Indicador de barras* que se puede ver en la sección 2.3 de este proyecto, donde se recomienda utilizar 1,5 para este parámetro.
- La *Frecuencia de corte para el orbital* en hercios donde se establece la frecuencia a la que se corta antes de hacer la transformada inversa de Fourier, tanto para la baja como para la alta frecuencia.
- El *Número de barras del rotor*.

- Las opciones de *Ver orbital* y *Ver gráficas temporales* hacen que se abran (o no) las respectivas ventanas después del cálculo de los indicadores.

3.4.3. Obtención de los indicadores y representación

Tras configurar todos los parámetros y tener datos cargados hay que ejecutar el programa, para ello desde la ventana principal, ir al menú superior *Obtener* y pulsar sobre *Obtener indicadores* como se muestra en la figura 3.11.

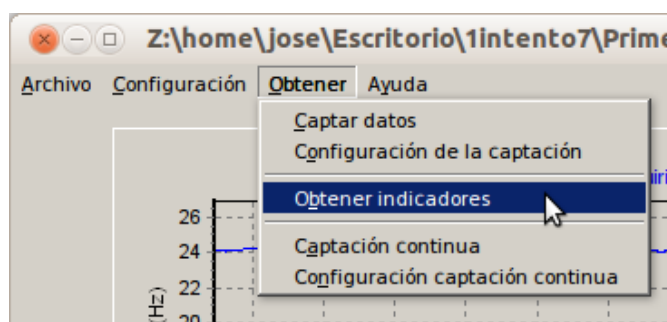


Figura 3.11: Ejecutar el tratamiento de datos y la obtención de indicadores.

Tras realizar todos los cálculos el programa devuelve en la ventana principal todos los indicadores expuestos en el capítulo anterior, como se expresa en la figura 3.12, para conocer que parámetros son cada indicador acudir al glosario de términos.

Si se ha marcado la casilla de la ventana de configuración, en la pestaña de indicadores: *Ver orbital* y *Ver gráficas temporales* se mostrarán las respectivas ventanas tras el cálculo de los indicadores.

En la figura 3.13 tenemos una muestra de la ventana de *FFT* donde se puede ver a primera vista que la ventana se encuentra dividida en dos partes, una donde se representan las gráficas temporales mas representativas (F_{mm} , el Módulo de la FFT espacial F_t^p , la velocidad en función del tiempo del campo magnético w_t , y el deslizamiento instantáneo $s_{Fr}(t)$), y otra donde se muestran los datos en el dominio de la frecuencia mas representativos (El espectro de la velocidad de giro de la TMF (w_F^p), el deslizamiento instantáneo en el dominio de la frecuencia

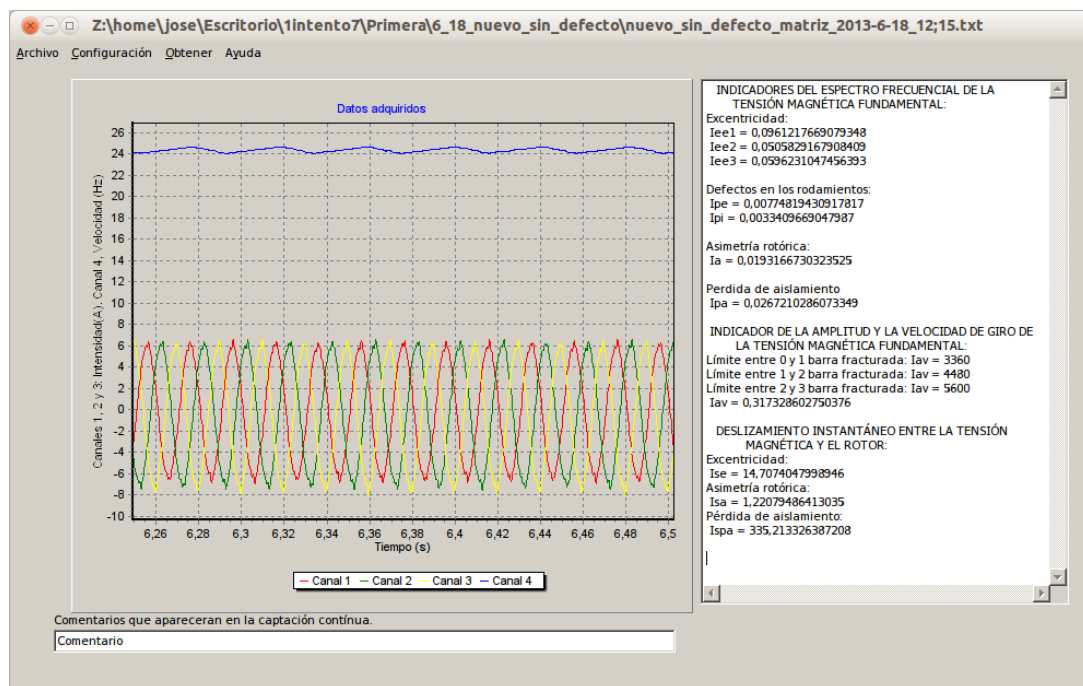


Figura 3.12: Ventana principal tras la obtención de los indicadores donde se puede visualizar como se exponen los indicadores.

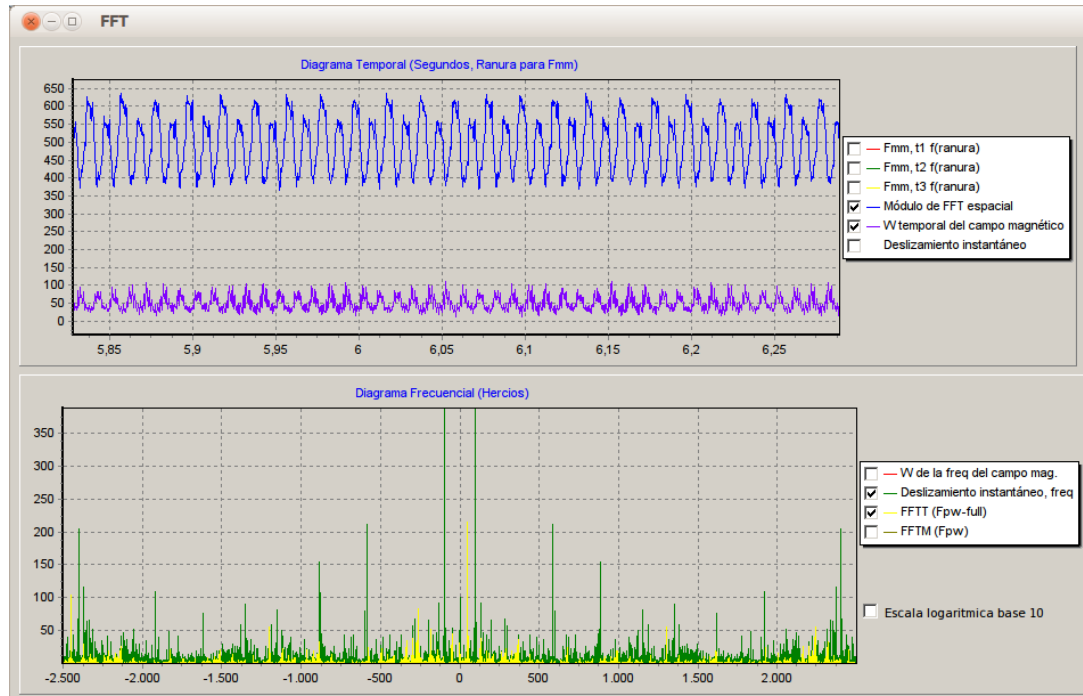


Figura 3.13: Ventana donde se representan los valores temporales y frecuenciales mas característicos del estudio.

normalizado ($Sw_{F_r}^n$), el módulo del espectro completo de la TMF (F_{w-full}^p) y el espectro del módulo de la TMF (F_w^p).

Los diagramas se pueden ampliar, mover y reducir como se ha explicado anteriormente con el ratón, y aparte se pueden activar y desactivar en tiempo de ejecución las variables que queremos ver representadas en cada momento desde la leyenda. Además para el diagrama frecuencial se ha añadido la opción de ver la gráfica en escala logarítmica, a través de una casilla situada debajo de su leyenda.

En la figura 3.14 tenemos un ejemplo de la ventana del orbital, donde podemos encontrarnos con el orbital de excentricidad, asimetría rotórica y pérdida de aislamiento estudiadas en el capítulo anterior, es un diagrama polar y la amplitud va en porcentaje. Al igual que el diagrama de la ventana anterior las variables se pueden activar o desactivar desde la leyenda y utilizar las funciones de zoom directamente con el ratón como los demás diagramas.

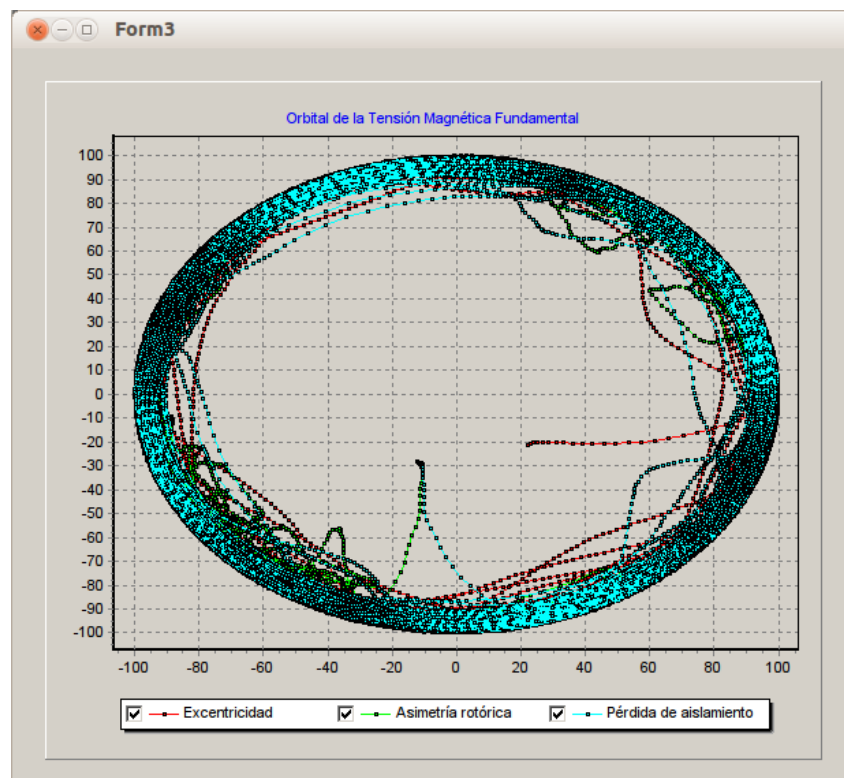


Figura 3.14: Ventana donde se representan los orbitales estudiados en el capítulo 2.

3.4.4. Guardar indicadores

Una vez obtenidos los indicadores estos pueden ser añadido a la última fila de una matriz para posteriormente guardar esta matriz, para ello lo primero es crear la matriz y la primera línea de la matriz. En la primera línea se escriben los nombres de los indicadores correspondientes a cada columna, todo esto se realiza a través del botón *Insertar primera línea de indicadores* en el menú *Configuración* de la ventana principal como muestra la figura 3.15.b.

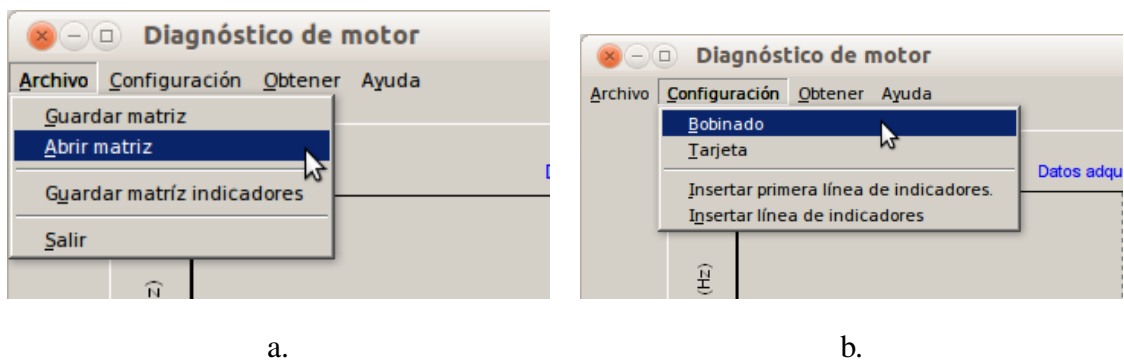


Figura 3.15: Opciones en el programa para el guardado de indicadores.

Después de crear la matriz ya se puede añadir filas tras cada obtención de indicadores, para realizar esta acción basta con pulsar el botón de *Insertar línea de indicadores* como se muestra en la figura 3.15.b, tras lo cual aparecerá en la ventana principal un mensaje como que se ha realizado esta acción. Los comentarios que se quieran escribir en la parte inferior de la ventana principal se reflejarán en la última columna de cada fila. En la primera columna se escribe el nombre de la ventana principal sin la ruta completa, para facilitar la identificación tras abrir los datos desde una matriz.

Tras completar la matriz con los indicadores de las distintas obtenciones solo queda guardar esta, para ello pulsar el botón *Guardar matriz indicadores* del menú *Archivo* de la ventana principal del programa, como muestra la figura 3.15.a. La matriz será guardada en archivo de texto de windows (*.txt) para facilitar su posterior recuperación. Tras guardar la matriz se obtiene una notificación en la ventana principal con la ruta donde se ha guardado esta.

3.5. Captación continua

Ya se ha visto como funciona el programa, y como se obtienen los indicadores, por último se pensó que el programa podría trabajar continuamente para obtener un numero definido de indicadores, a esta opción se le ha denominado captación continua.

3.5.1. Configuración de la captación continua.

Para poder configurar esta opción se ha incorporado una pestaña a la ventana de configuración, para llegar a ella desde la ventana principal tiene que ser desde el menú *Obtener* el botón *Configuración captación continua* como se muestra en la figura 3.16.

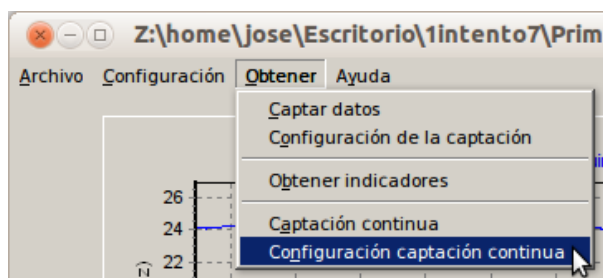


Figura 3.16: Menú para la apertura de la configuración de la captación continua.

La ventana de configuración en la pestaña de *Temporizador* es la representada en la figura 3.17.

Las opciones de las que se dispone en esta ventana son:

- El *Tiempo entre captaciones (min)*, se decide poner el tiempo entre captaciones para que no se solapen las captaciones produciendo el colapso del sistema.
- El *Número de captaciones* es el número de captaciones que se van a realizar.
- El *Tiempo aproximado (min)* es una aplicación en tiempo de ejecución que te dice el tiempo aproximado que va a tardar la captación continua.

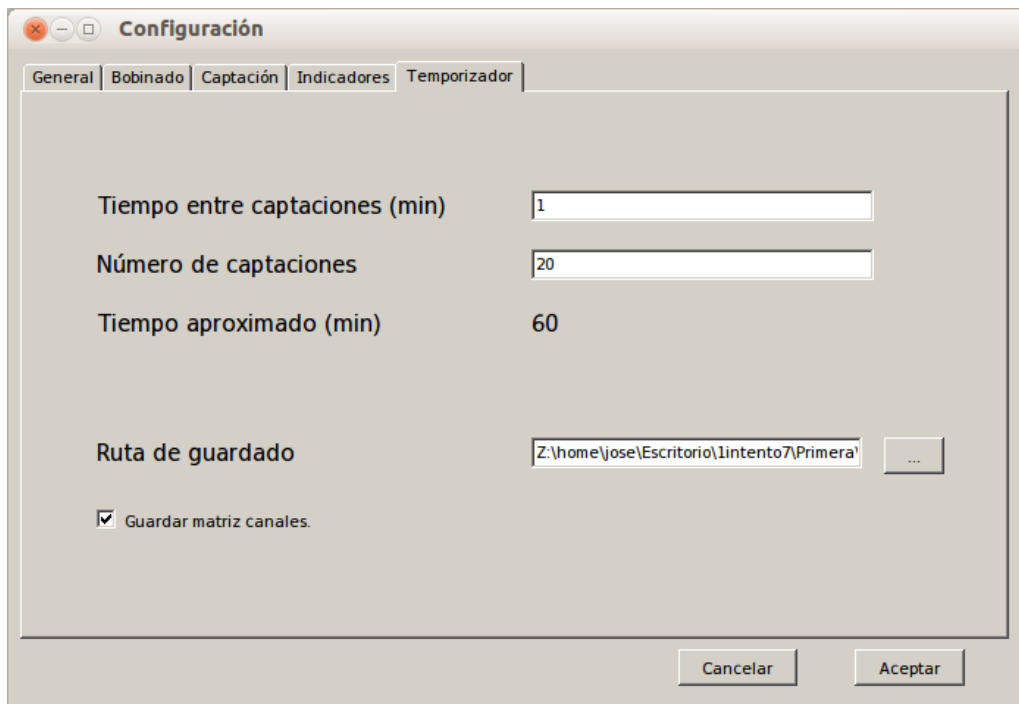


Figura 3.17: Pestaña de la configuración de captación continua.

- La *Ruta de guardado*: en este apartado se pone la ruta, y la primera parte del nombre de los archivos que se van a crear en la captación continua, el programa solo añade la fecha y la hora a cada matriz de datos o a la matriz de indicadores final. Por ejemplo, si se escribe la ruta con el nombre *C* : `\Users\USUARIO\Desktop\Ensayos\Excentricidad.txt` obtendremos en la carpeta especificada en la ruta todos los archivos, donde las matrices con los datos de intensidades tendrán el nombre `Excentricidad_matriz_2013-5-22_9;50.txt`, y la matriz con los indicadores tendrá el nombre `Excentricidad_2013-5-22_9;42.txt`.
- La casilla de la opción *Guardar matriz canales* lo que hace es guardar no solo los indicadores finales, sino las matrices de datos que se crean en cada captación, con el mismo sistema mencionado en la sección 3.3.

3.5.2. Funcionamiento de la captación continua

Hay que tener en cuenta que todos los parámetros configurados anteriormente son usados en la captación continua, por ejemplo si están marcadas las opciones de *Ver orbital* y *Ver gráficas temporales* cada vez que se obtengan los indicadores aparecerán las respectivas ventanas.

Para poder diferenciar entre los distintos datos guardados se cambia el nombre y se le incorpora la hora y la fecha de cada captación en las matrices guardadas.

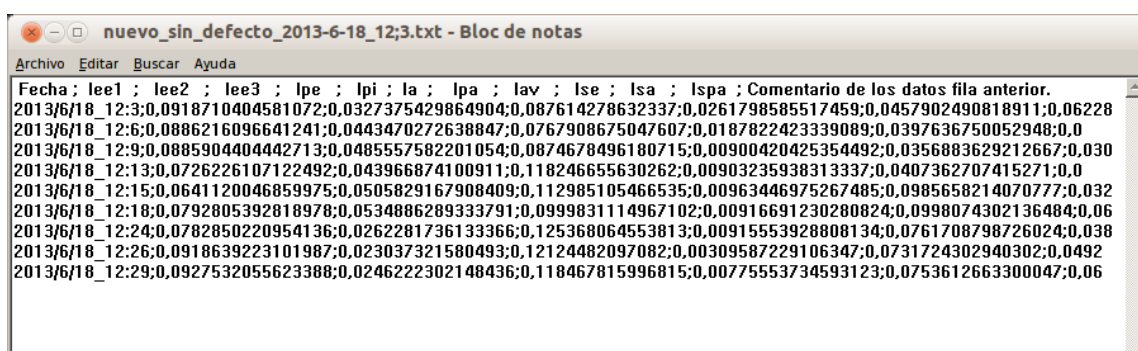


Figura 3.18: Ejemplo de matriz de indicadores.

Cada vez que se hace una captación y se obtienen los indicadores estos son añadidos en las filas de una matriz, cuando termina la captación continua se guarda con la ruta configurada. Además de los indicadores, como última columna de la fila se guardan los comentarios escritos, en tiempo de ejecución de la captación continua, en la parte inferior de la ventana principal. En la figura 3.18 aparece la forma de guardado en el archivo de texto.

En la ventana principal aparece el número de captaciones que quedan por realizar en tiempo de ejecución de la captación continua.

Capítulo 4

Ensayos experimentales

4.1. Introducción

En este capítulo se describirán los diversos ensayos realizados en un banco de pruebas montado en el laboratorio de Verificación Mecánica del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica de Cartagena como se describe en el anexo A.1, con el fin de probar la eficacia y fiabilidad de los sistemas comerciales ya estudiados en el proyecto anterior [9], respecto al sistema desarrollado en este proyecto y de esta manera comprobar la validez de la metodología para la obtención de indicadores propuesta en la tesis [8] y sobre la que se ha desarrollado este proyecto.

4.2. Pruebas iniciales con el motor en buen estado.

En los ensayos experimentales se utiliza un estátor reparado con anterioridad y un estátor nuevo. Tras la correcta puesta a punto de los equipos y tras varias pruebas iniciales se comienza a obtener datos.

4.2.1. Captación con el sistema ideado en este proyecto.

El estátor reparado se utiliza como referencia en los ensayos de excentricidad, pérdida de aislamiento y rotura de barra, y el estátor nuevo se utiliza para fallo en rodamientos.

Los dos estátors utilizados se someten en estado normal (sin provocarle ningún fallo) a 20 captaciones de datos durante una hora, de donde se obtienen los indicadores representados en la figura 4.1.

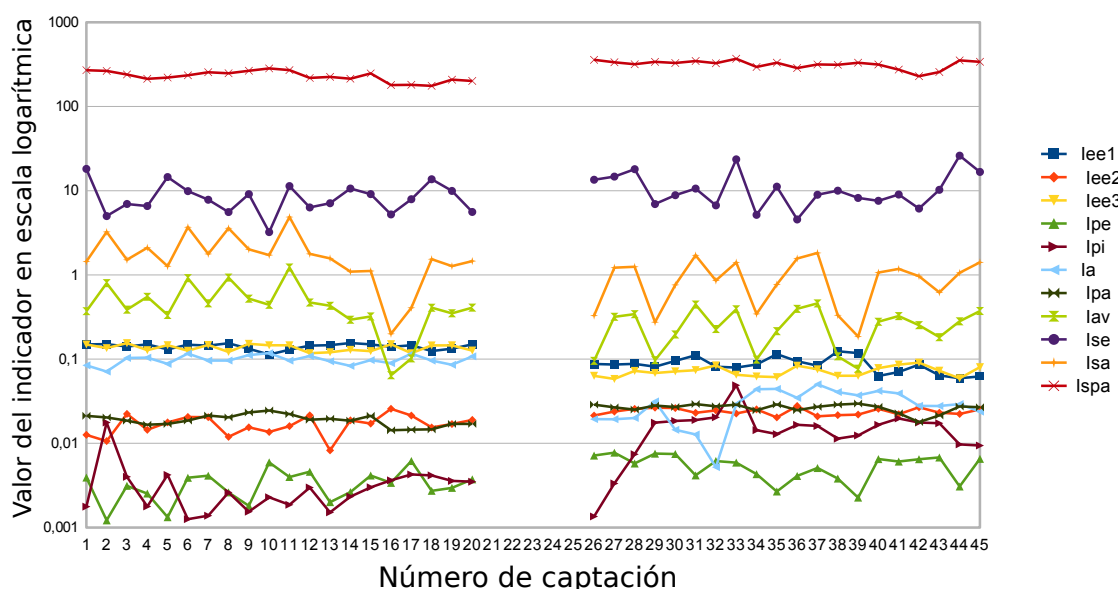


Figura 4.1: Comparación de los indicadores para los dos estátors utilizados en estado normal, sin producirles ningún defecto. A la izquierda estátor reparado y a la derecha datos de los indicadores en el estátor nuevo

Como se observa en los valores de los indicadores representados en la figura 4.1 los indicadores permanecen aproximadamente constantes a lo largo del ensayo, obteniéndose ciertas oscilaciones en los datos. Estas oscilaciones tan pronunciadas son causadas por el efecto ventana rectangular a la hora de realizar la transformada de Fourier, que hace que los valores reales de la transformada de la señal varíe en cada captación.

Algunos indicadores cambian de valor de un estátor a otro, como por ejemplo el indicador de asimetría rotórica (Ia) en la técnica basada en el espectro frecuencial de la TMF, este error se

le atribuye a que al ser un estátor reparado hay alguna variación en el aislamiento que produce oscilaciones en las intensidades de entrada, y por tanto cambian ciertos indicadores. Por este motivo depende del estátor con el que se realiza el ensayo se utiliza como referencia los datos de uno o de otro.

4.2.2. Sistema One-Pro

Durante la puesta en funcionamiento del motor en buen estado el sistema realiza varias captaciones, mostrando varias alarmas aleatoriamente durante estas como valores de armónicos de distorsión elevados (THD y THDF) o daños en los rodamientos. El indicador de excentricidad dinámica no muestra nunca ningún valor aunque la alarma permanece activa como muestra la figura 4.2.

Electrical Status Screen									
Operating Parameters	Rot Spd Logic								
	24.4 /ARCHA								
Parameters	C1	C2	C3	V1	V2	V3			
Power Factor	0.947	0.961	0.956				Running speed	24.4	
RMS Value	4.75	4.80	4.62	387	388	388	Demand power	3.03	
Peak Value	7.04	7.15	6.94	551	555	552	Motor load	84.1	
Crest Factor	1.48	1.49	1.50	1.42	1.43	1.42	Motor efficiency	83.8	
Impedance	81.5	80.8	83.9				OutPut power	2.54	
Static eccentricity							OutPut torque	16.6	
Dynamic eccentricity							Volt var. from NP	2.14	
Stator mech. damage							Rotor bar damage	1.00	
Bearing damage							Mech unbal misalign		
Electrical unbalanced	2.18			0.086			Line frequency	50.0	
THD All	2.61	2.81	3.14	1.19	1.24	1.13	Voltage Distorsion	99.3	
Max inrush current							THDF factor	95.4	
Duration							PolePass side ban	67.2	

Figura 4.2: Ventana de alarmas del sistema One-Pro durante el ensayo con el motor en buen estado.

4.3. Ensayos de excentricidad mecánica.

En este ensayo se busca provocar una excentricidad apreciable en el motor, de manera que el rotor girara alrededor del estátor con una cierta holgura, provocando en teoría importantes cambios en los parámetros eléctricos y mecánicos.

4.3.1. Realización del ensayo

Para este ensayo se lleva la tapa trasera a un taller de mecanizado y se aumenta el diámetro del agujero de la tapa pasando de 62 mm a $62,4\text{ mm}$, es decir, se aumentó el diámetro del agujero en 4 décimas de mm , en la figura 4.3 se observa la tapa mecanizada.



Figura 4.3: Tapadera usada para provocar la excentricidad.

Se realizan varios ensayos con distinto grado de excentricidad, usando la misma tapa pero modificando el centro geométrico del eje en distinto grado mediante el empleo de distintas chapas calibradas que se colocan entre el rodamiento y la tapa.

4.3.2. Resultados obtenidos

Se realizan dos ensayos con distinto grado de excentricidad:

- Ensayo de excentricidad 1, donde se introducen dos chapas calibradas entre el rodamiento y la tapa de $0,1\text{ mm}$ de espesor, solapándose y haciendo como una chapa de $0,2\text{ mm}$, y en el lado diametralmente opuesto del rodamiento una única chapa de $0,1\text{ mm}$ de espesor.

- Ensayo de excentricidad 2, donde se introducen dos chapas de 0,1 mm solapadas (haciendo como una de 0,2 mm) entre el rodamiento y la tapa, dejando una holgura considerable que producirá un defecto mayor.

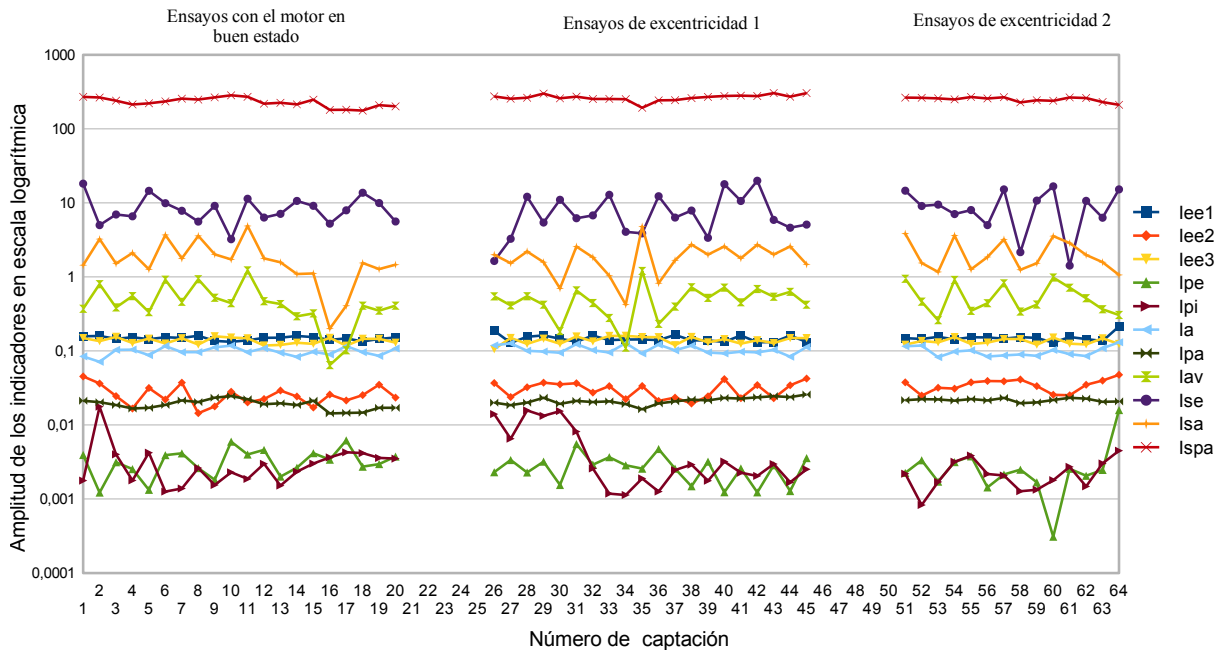


Figura 4.4: Indicadores obtenidos en los ensayos de excentricidad en escala logarítmica.

Como se muestra en la figura 4.4 no se tiene ningún cambio significativo en ningún indicador durante este ensayo.

Hay que mencionar que el segundo ensayo se detuvo debido a un agravamiento del defecto. Se pueden ver cambios evidentes en los indicadores propios de este defecto, pero la mayor sensibilidad como se muestra en la figura 4.4 se obtiene en el indicador de defecto en rodamiento en pista exterior lpe debido a que el defecto de excentricidad y de rodamiento tiene características y efectos similares. En futuros estudios debería ser considerado este indicador para defecto de excentricidad.

Técnica basada en el espectro frecuencial de la TME.

El método de obtención de estos indicadores se expone en la sección 2.2, donde como se muestra para el defecto de excentricidad se obtienen tres indicadores distintos.

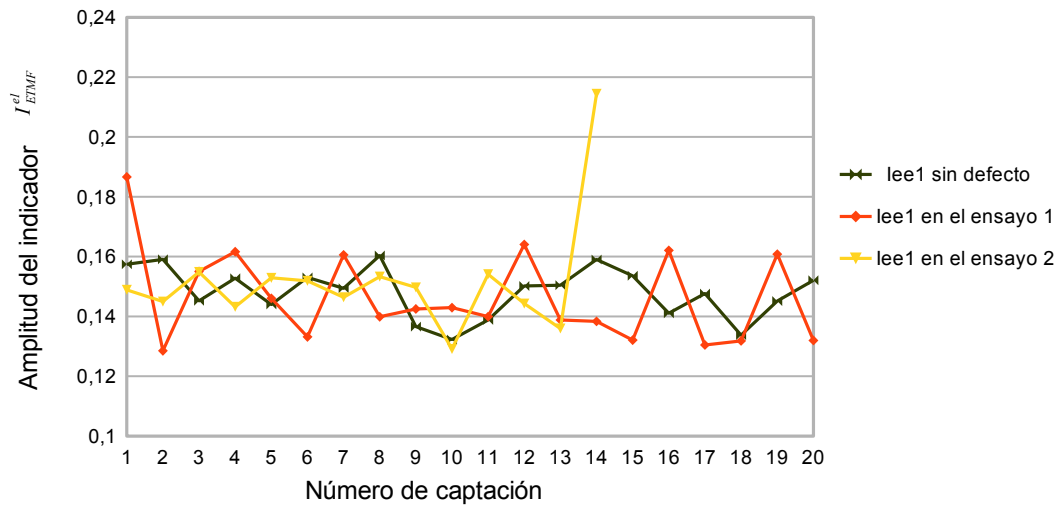


Figura 4.5: Indicador I_{ETMF}^{e1} (Iee1 en la terminología del programa) en los ensayos de excentricidad

En el indicador I_{ETMF}^{e1} (Iee1 en la terminología del programa) no se puede apreciar ningún cambio importante dentro de la aleatoriedad de los datos obtenidos, excepto en el agravamiento del propio defecto por funcionamiento del sistema en el ensayo 2, donde si se observa un aumento considerable como se muestra en la figura 4.5.

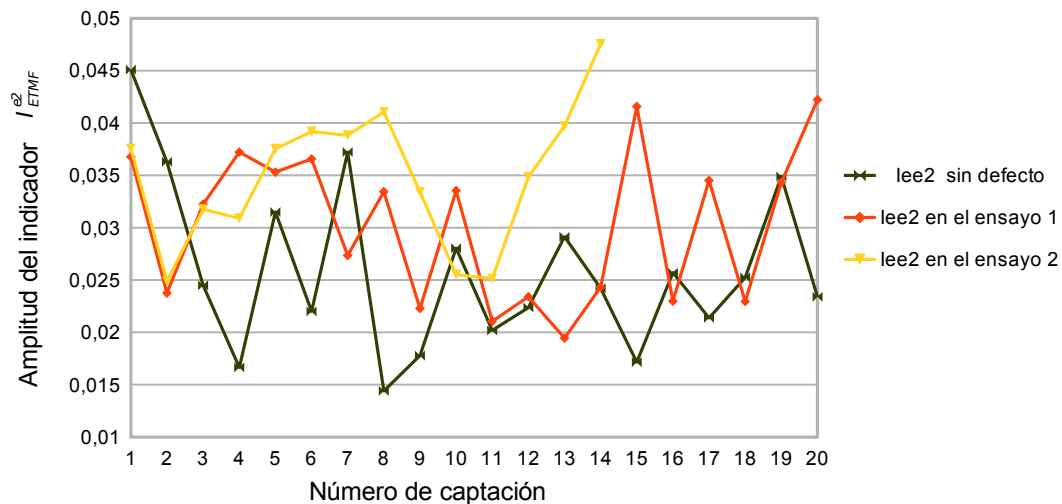


Figura 4.6: Indicador I_{ETMF}^{e2} (Iee2 en la terminología del programa) en los ensayos de excentricidad

Como se puede observar en la figura 4.6 se produce el mismo efecto en el indicador I_{ETMF}^{e2} que en el indicador I_{ETMF}^{e1} estudiado anteriormente, es decir, no se observan cambios aprecia-

bles a lo largo de los ensayos excepto en la última captación del segundo ensayo, donde hay un aumento considerable de este indicador y por lo tanto considerando su funcionamiento con el agravamiento de este defecto.

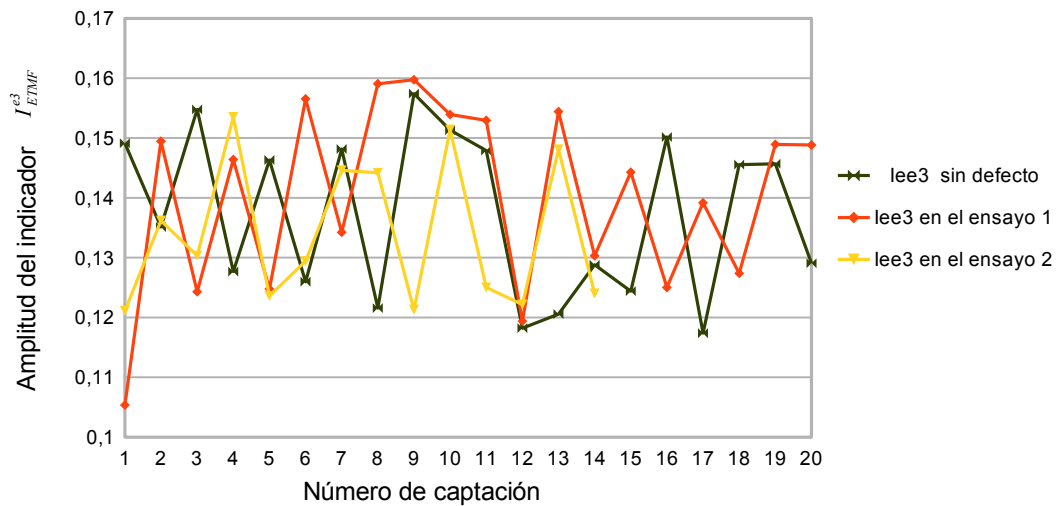
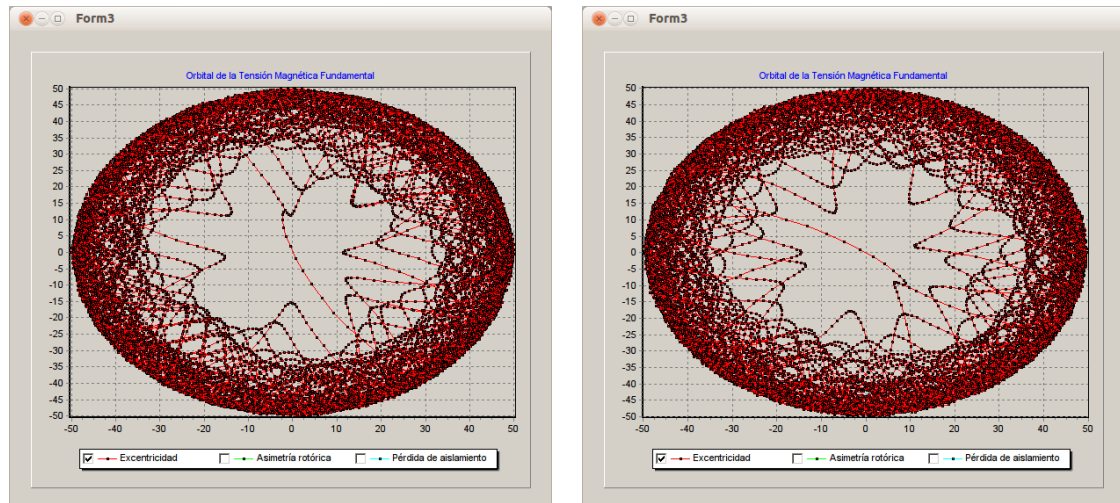


Figura 4.7: Indicador I_{ETMF}^{e3} (Iee3 en la terminología del programa) en los ensayos de excentricidad

En el indicador I_{ETMF}^{e3} (Iee3 en la terminología del programa) no se puede apreciar ningún cambio importante dentro de la aleatoriedad de los datos obtenidos, ni siquiera con el agravamiento del mismo como sucedía con los indicadores de excentricidad anteriores. Este hecho puede ser debido a que este indicador se considera más sensible a la excentricidad dinámica que a la excentricidad estática, en contraposición de los indicadores anteriores que les sucede lo contrario como se expone en la sección 2.2, siendo el ensayo provocado excentricidad estática ya que el eje de giro y el eje del rotor no varía entre si, pero si que se varían los dos respecto al eje del estátor.

Técnica basada en la forma del orbital de la TMF

Como se ha mencionado en la sección 2.4 para obtener el orbital de excentricidad se emplea la velocidad de giro instantánea del eje donde se tiene un error significativo, tal y como se refleja en el anexo B.4 de la página 87.



a.

b.

Figura 4.8: a.Orbital de excentricidad en el ensayo con el motor en buen estado. b. Orbital de excentricidad en el ensayo de excentricidad.

En la figura 4.8 no se consigue apreciar el defecto de excentricidad debido a que aparece una oscilación producida por el error en la captación de la velocidad de giro del eje. De este modo no se consiguen ver cambios significativos al comparar el orbital en el ensayo con el orbital obtenido con el motor en buen estado como se aprecia en la figura 4.8.

Técnica basada en el deslizamiento instantáneo entre la tensión magnética y el rotor

El método de obtención de este indicador se expone en la sección 2.5, donde como se muestra para el defecto de excentricidad se obtiene un único indicador I_S^e .

En el indicador I_S^e (Ise en la terminología del programa) no se puede apreciar ningún cambio importante dentro de la aleatoriedad de los resultados, esto puede ser debido a la captación instantánea de la velocidad usada para la obtención de este indicador, debido a que no se hace de manera precisa como se expresa en el anexo B.4.

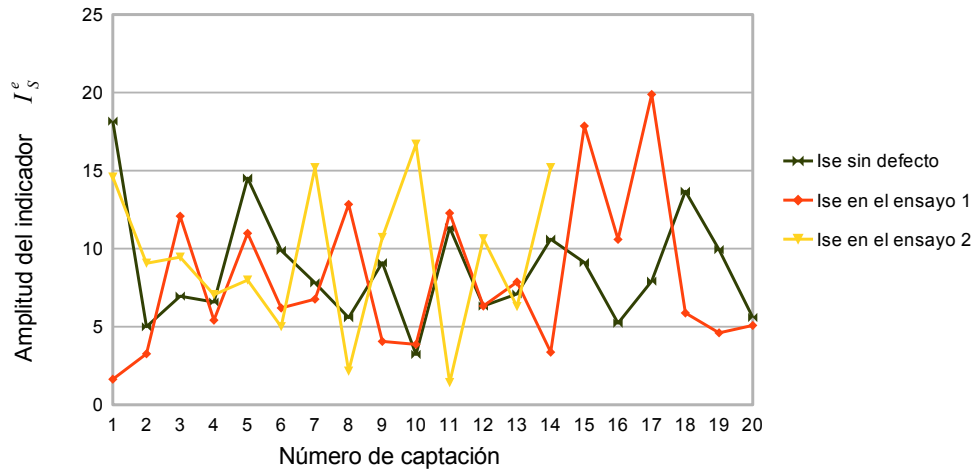


Figura 4.9: Evolución del indicador I_s^e (Ise en la terminología del programa) en los ensayos de excentricidad

4.3.3. Sistemas comerciales

Durante los ensayos de excentricidad *no se aprecian cambios importantes* en los valores de alarma del sistema *One-Pro*, aunque siguen apareciendo aleatoriamente otros defectos no se pueden considerar que sean debidos a este ensayo ya que no permanecen constantes o en estado de alarma.

Según el proyecto final de carrera de la bibliografía el *sistema MCM* es *incapaz de detectar este defecto* en ninguno de los ensayos que se realizaron.

4.3.4. Conclusiones del ensayo de excentricidad.

Hay indicios de que el sistema funcione con los indicadores I_{ETMF}^{e1} y I_{ETMF}^{e2} , además del indicador de defecto en rodamiento de pista exterior I_{ETMF}^{pe} , aunque como se ha descrito a lo largo de esta sección el resto de indicadores diseñados para detectar el defecto de excentricidad no se consigue estudiar de forma eficiente en este proyecto, I_{ETMF}^{e3} se considera sensible a la excentricidad dinámica, ensayo que no se ha llevado a cabo en este proyecto, y el resto de indicadores se obtienen a partir de la velocidad instantánea de giro del eje, en el cual se comete un error de medida como se expone en la sección B.4 del anexo. En contraposición se tienen

los dos sistemas comerciales que no han sido capaces de identificar este defecto, de este modo se considera que para reconocer el defecto de excentricidad solo se puede emplear el sistema desarrollado en este proyecto.

4.4. Ensayos de defecto y fallo de rodamientos.

En este ensayo se busca provocar un defecto en los rodamientos suficiente para que sea detectado por los sistemas instalados.

4.4.1. Realización del ensayo

Para la realización de este ensayo se utiliza un rodamiento con deterioro generalizado utilizado en el primer ensayo del apartado 4.8 del proyecto final de carrera de la bibliografía [9].

Los rodamientos que lleva el motor eléctrico del banco de pruebas son rodamientos de bolas de acero templado, de 62 mm de diámetro exterior y 30 mm de diámetro interior. Utiliza un rodamiento para la parte delantera y otro en la parte trasera.



Figura 4.10: Rodamiento defectuoso usado en el ensayo.

El defecto en rodamientos es uno de los más estudiados en vibraciones como se muestra en la bibliografía, ya que la vibración es muy sensible a este tipo de defecto. Se va a realizar un

único ensayo para el indicador que muestra defectos en los rodamientos, este defecto no va a ser puntual sino generalizado, producido por un rodamiento que ha sido utilizado mas tiempo de la vida útil del mismo, mostrando signos evidentes de desgaste.

4.4.2. Resultados obtenidos

En la figura 4.11 se observa la variación de los indicadores, no solo de los propuestos para este defecto, sino de todos los programados.

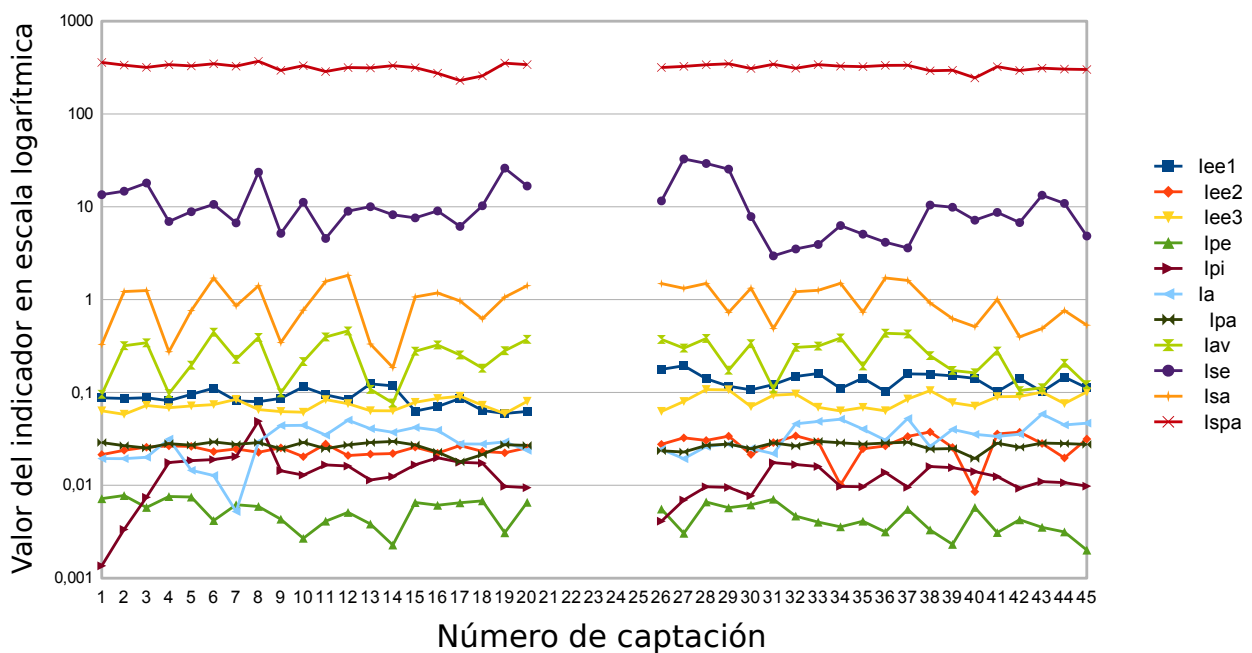


Figura 4.11: Valor de todos los indicadores obtenidos en el ensayo de defecto en rodamientos (las últimas 20 captaciones de la derecha), frente a los obtenidos en el ensayo con el motor en buen estado (las 20 primeras captaciones de la izquierda)

No se observa ninguna variación que se deba tener en cuenta excepto en el indicador de excentricidad Iee1 (I_{ETMF}^{e1} en la nomenclatura del programa), que como se observa en la figura 4.12 es bastante considerable (sobre todo al realizar el promediado) y debería de ser estudiada su aplicación en este tipo de defecto en futuros estudios. Hay que tener en consideración que el

defecto en rodamientos y de excentricidad provoca efectos parecidos por ser defectos relacionados con los apoyos del rotor, de hecho en parte de la bibliografía usada se considera como un único defecto, no siendo de extrañar esta interacción entre los indicadores.

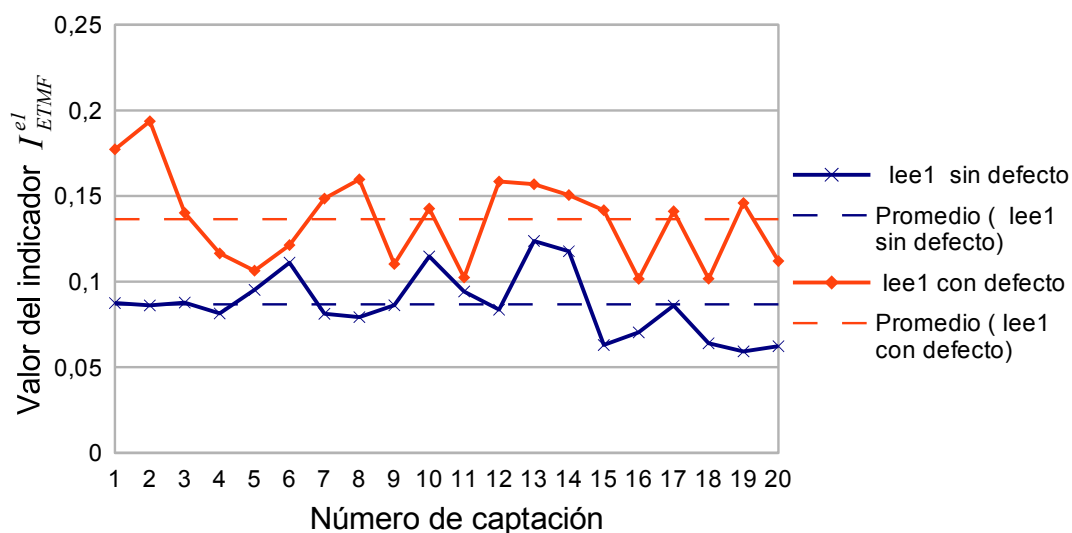


Figura 4.12: Evolución del indicador de excentricidad Iee (I_{ETMF}^{el}) en el ensayo de defecto en rodamiento.

Técnica basada en el espectro frecuencial de la TME.

El defecto en los rodamiento solo se tiene en consideración con esta técnica como queda reflejado en la sección 2.2 de la página 8, y se exponen dos indicadores distintos a frecuencias distintas según sea el defecto en la pista exterior o interior del rodamiento, denominados Ipe (I_{ETMF}^{pe}) e Ipi (I_{ETMF}^{pi}) respectivamente.

Como se puede observar en las figuras 4.13 y 4.14 no hay variación apreciable de ninguno de los dos indicadores diseñados para este tipo de defectos.

4.4.3. Sistemas comerciales

El sistema *One-Pro* continúa comportándose como hasta el momento, saltando alarmas de forma aleatoria excepto la de desequilibrio eléctrico que durante este ensayo aparece constante-

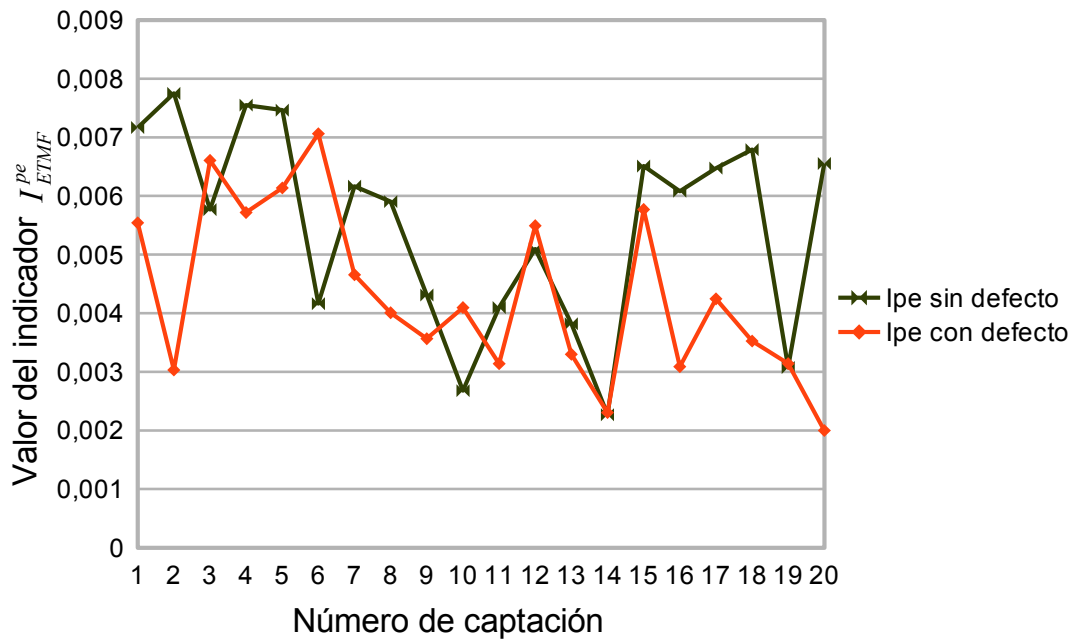


Figura 4.13: Evolución del indicador de fallo en pista exterior del rodamiento Ipe (I_{ETMF}^{pe}) en el ensayo de defecto en rodamiento.

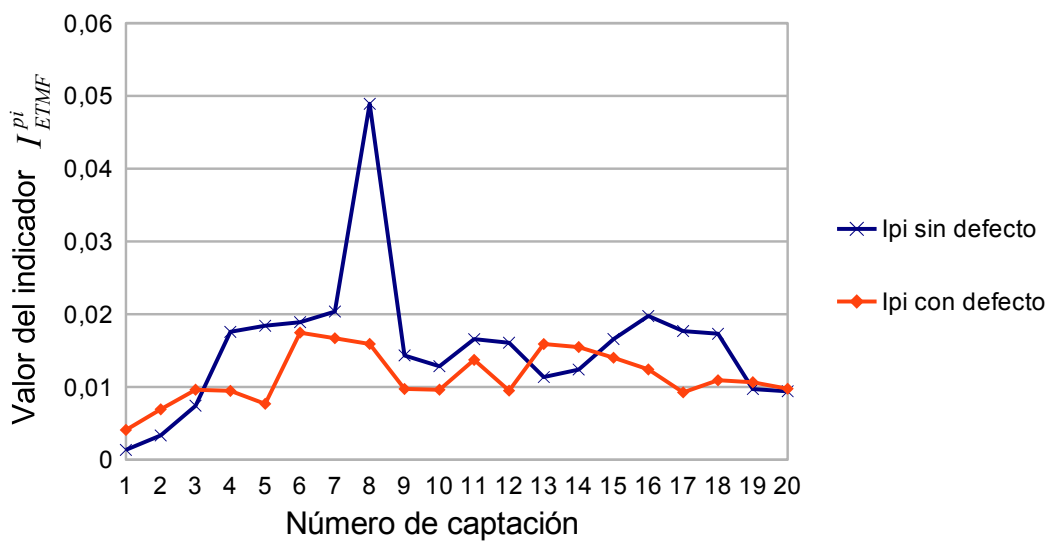


Figura 4.14: Evolución del indicador de fallo en pista interior del rodamiento Ipi (I_{ETMF}^{pi}) en el ensayo de defecto en rodamiento.

mente como se muestra en la figura 4.15. Hay que señalar que una de las alarmas que *se activan de forma aleatoria* durante el ensayo es de *daño en los rodamientos*.

Electrical Status Screen									
Operating Parameters	Rot Spd	Logic							
	24.4	MARCHA							
Parameters	C1	C2	C3	V1	V2	V3			
Power Factor	0.962	0.979	0.971				Running speed	24.4	
RMS Value	4.96	4.99	4.70	403	404	404	Demand power	3.31	
Peak Value	7.37	7.60	7.12	567	571	567	Motor load	92.1	
Crest Factor	1.49	1.52	1.51	1.41	1.41	1.40	Motor efficiency	83.5	
Impedance	81.2	80.9	85.9				OutPut power	2.77	
Static eccentricity							OutPut torque	18.1	
Dynamic eccentricity							Volt var. from NP	0.875	
Stator mech. damage							Rotor bar damage	2.00	
Bearing damage							Mech unbal misalig		
Electrical unbalanced	3.73			0.130			Line frequency	50.0	
THD All	2.89	3.26	3.32	1.36	1.30	1.35	Voltage Distorsion	99.5	
Max inrush current							THDF factor	95.2	
Duration							PolePass side ban	60.7	

Figura 4.15: Ventana de alarmas proporcionada por el sistema One-Pro durante el ensayo de defecto en rodamiento.

Como se menciona en el anexo este sistema incorpora un módulo de medida de vibración, que como es lógico durante este ensayo se encuentra en estado de alerta.

El sistema MCM sigue según la bibliografía sin comportarse adecuadamente en este tipo de defecto.

4.4.4. Conclusiones del ensayo.

No se ha observado sensibilidad al defecto del rodamiento en ninguno de los indicadores desarrollados para la detección del mismo, pero si se ha observado variación en el indicador de excentricidad I_{ETMF}^{e1} , que debería de tenerse en cuenta en futuros estudios para este defecto. Los sistemas comerciales no se comportan eficientemente con este defecto, aunque el indicador de defecto en rodamiento en el sistema One-Pro se muestre en alarma en un 15 % de las captaciones que realiza, no se considera suficiente como para considerar que detecta el fallo.

4.5. Ensayos de pérdida de aislamiento.

Para la realización de este ensayo se busca provocar una pérdida de aislamiento al bobinado del estátor con distintos grados de defecto.

4.5.1. Realización del ensayo

El defecto buscado es la pérdida de aislamiento se realiza entre espiras de la misma bobina debido a que es el defecto mas común. Para conseguirlo se utiliza un estátor que ya había sido reparado con anterioridad, se le quita el aislante que tiene entre espiras de una misma bobina y se cortocircuitan espiras gradualmente mediante un cable de cobre como muestra la figura 4.16.

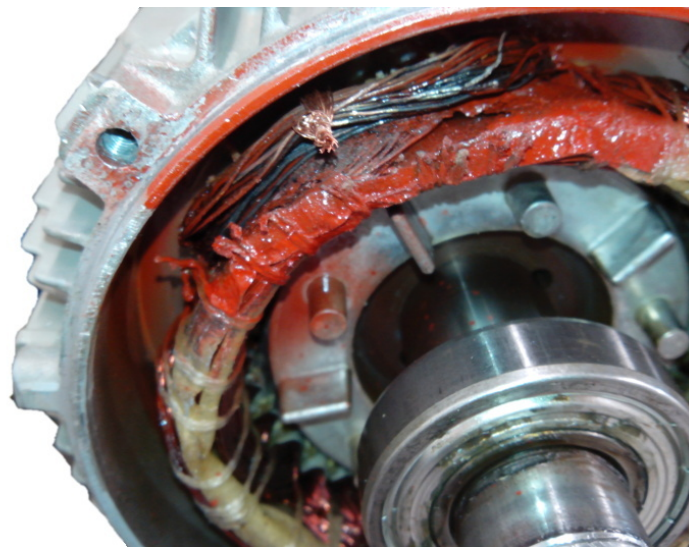
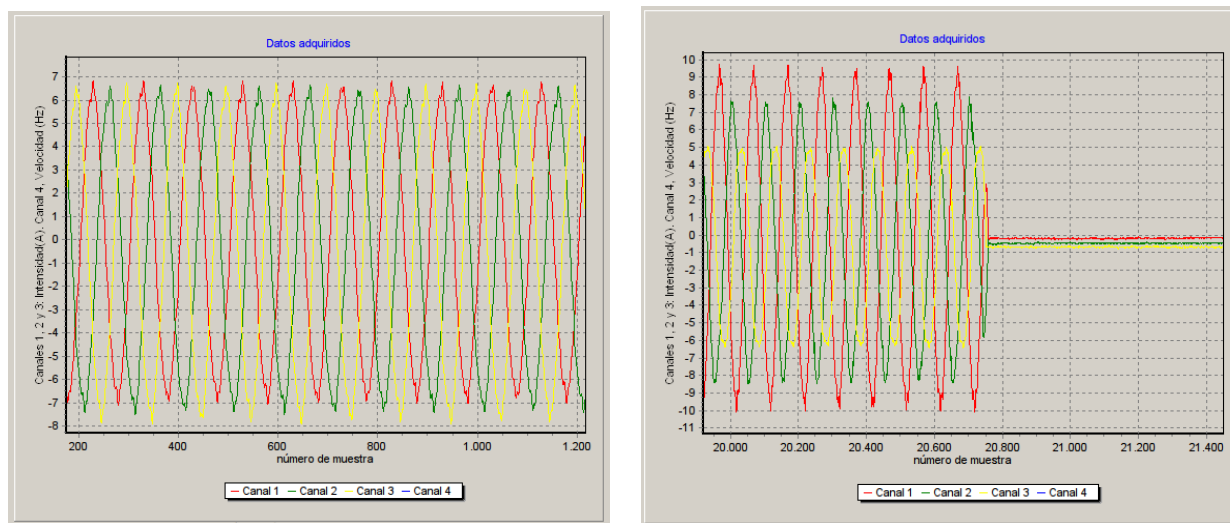


Figura 4.16: Pérdida de aislamiento provocada en la bobina I_t del estátor.

En la pérdida de aislamiento se observa un desequilibrio entre las intensidades de las fases que va aumentando según el grado del defecto que se le produce, esta degradación se consigue aumentando el número de espiras que se cortocircuitan como se muestra en la figura 4.17.

En el gráfico *a.* de la figura 4.17 se observa un pequeño desequilibrio en el canal 3 correspondiente a la fase *t*, es el ensayo donde se han cortocircuitado el menor número de espiras



a.

b.

Figura 4.17: Evolución gráfica de la evolución en la pérdida de aislamiento.

posibles. Al comienzo del gráfico *b*, ya se observa un desequilibrio severo debido a un mayor número de espiras cortocircuitadas, este ensayo se consiguió repetir dos veces más, hasta que el defecto producido se agravó por su puesta en funcionamiento hasta tal nivel que no se consigue tomar una muestra completa sin que salte el diferencial como muestra el gráfico *b*, donde se captó el corte del diferencial.

4.5.2. Resultados obtenidos

Al provocar defecto de aislamiento se produce un gran desequilibrio en las fases de entrada que produce en algunos casos no solo la variación del indicador diseñado para este defecto, sino como veremos la variación de algunos más.

En la figura 4.18 se observan todos los indicadores que se pueden obtener, en escala logarítmica. Los veinte primeros indicadores en el eje X son con el motor en buen estado, y los cuatro últimos provocándole el defecto de aislamiento. Como se puede observar hay más de un indicador que varía, como por ejemplo I_{se} , I_a ... pero no con tan radicalmente como I_{pa} e I_{spa} que son los indicadores estudiados para este defecto (recordar que está en escala logarítmica).

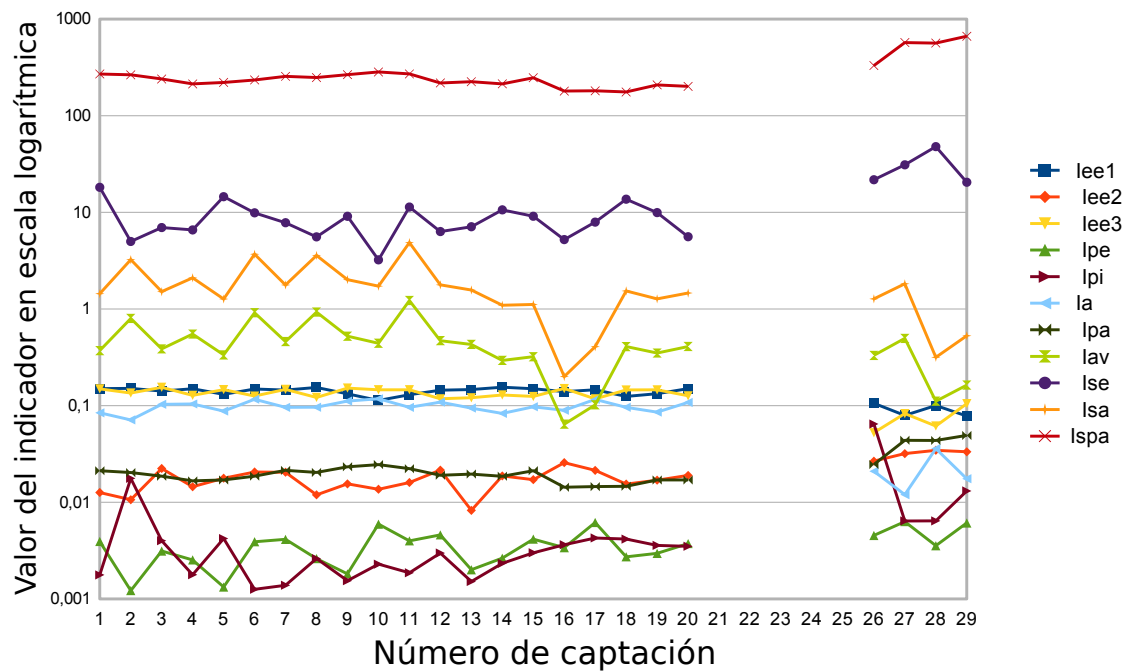


Figura 4.18: Gráfico con todos los indicadores en el ensayo de pérdida de aislamiento. A la izquierda se puede observar el valor de los indicadores obtenidos en el ensayo con el motor en buen estado, y a la derecha induciéndole el defecto de pérdida de aislamiento.

Técnica basada en el espectro frecuencial de la TMF.

La obtención de este indicador está expuesta en la sección 2.2.4 denominado I_{ETMF}^{pa} , y I_{pa} en el programa creado.

En la figura 4.19 se puede ver la eficiencia de este indicador en el ensayo de pérdida de aislamiento, se observa un claro aumento del valor del indicador durante el ensayo, y que en el primer ensayo produciendo el defecto ya se obtiene un aumento del indicador respecto a su valor en el motor sin defecto.

Técnica basada en la forma del orbital de la TMF

En la sección 2.4 se explica la obtención del orbital de la tensión magnética fundamental, siendo este el único que no emplea la velocidad de giro del rotor ya que se obtiene únicamente con la velocidad de giro de la TMF.

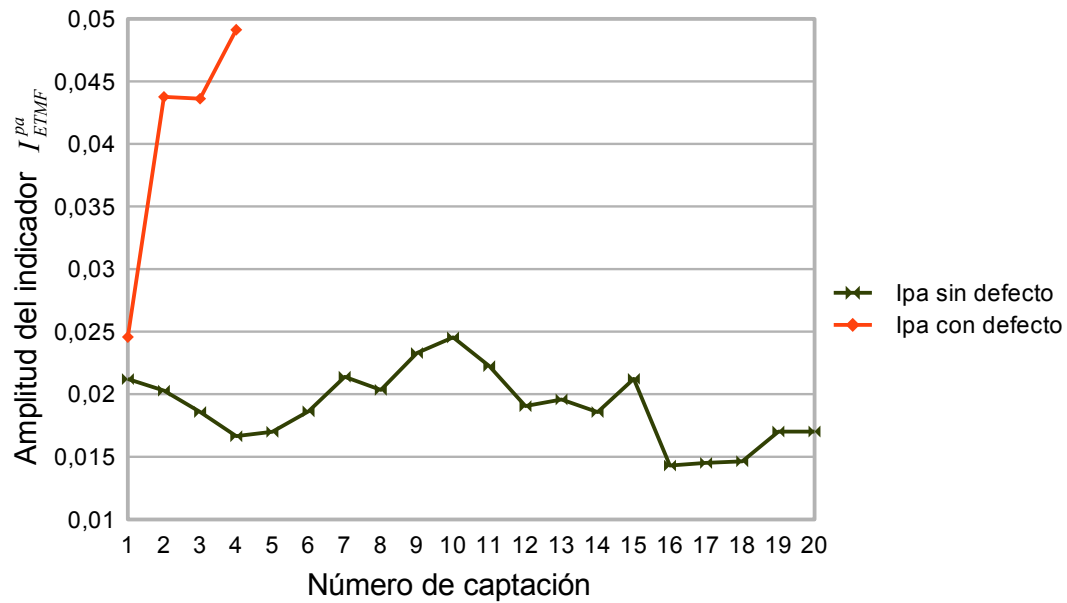


Figura 4.19: Evolución del indicador de pérdida de aislamiento en la técnica basada en el espectro frecuencial de la TMF en el ensayo de pérdida de aislamiento.

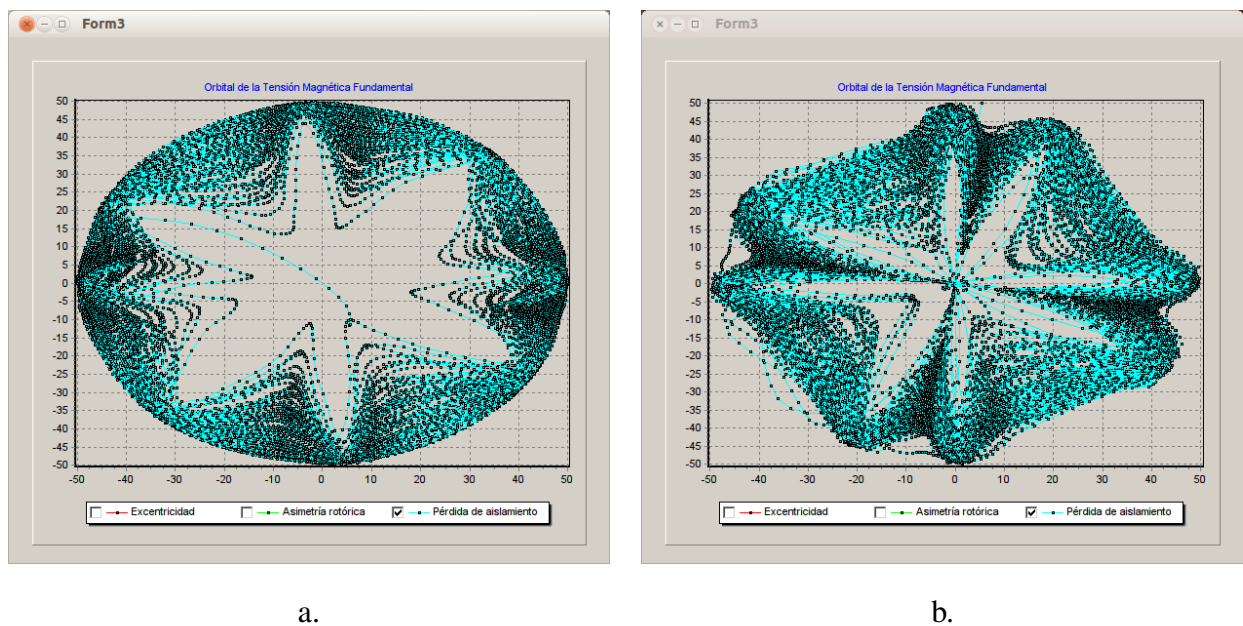


Figura 4.20: a.Orbital de defecto de aislamiento en el ensayo con el motor en buen estado. b. Orbital de defecto en aislamiento en el ensayo de defecto de aislamiento.

En la figura 4.20 se observa una clara distinción entre el orbital obtenido con el motor en perfecto estado, y el orbital obtenido induciéndole el defecto de pérdida de aislamiento, donde aparecen cuatro pétalos, como se menciona en la sección 2.4, indicando el defecto.

Técnica basada en el deslizamiento instantáneo entre la tensión magnética y el rotor

El indicador para esta técnica se denomina en la sección 2.5.3 de este proyecto como I_S^{pa} (I_{spa} en la nomenclatura del programa).

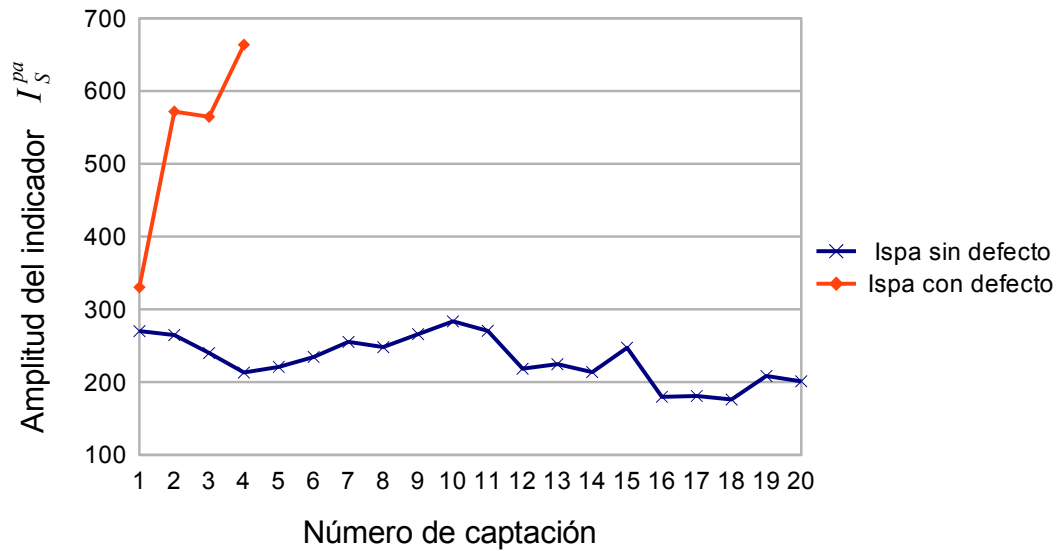


Figura 4.21: Evolución del indicador de pérdida de aislamiento en la técnica basada en el deslizamiento instantáneo entre la tensión magnética y el rotor en el ensayo de pérdida de aislamiento.

Al igual que ocurre con el indicador I_{ETMF}^{pa} nos encontramos con un claro aumento del valor del indicador ante este defecto, incluso en el ensayo donde es casi inapreciable el desequilibrio en las fases.

4.5.3. Sistemas comerciales

Durante el periodo de tiempo que estuvo el motor en funcionamiento con este tipo de defecto el sistema One-Pro no realizó ninguna captación, por lo que no tenemos ningún dato al respecto excepto lo expuesto en el proyecto final de carrera [9] donde se comenta que ninguno de los dos sistemas comerciales fue capaz de detectar este tipo de defecto.

4.5.4. Conclusión del ensayo

Todos los indicadores diseñados para detectar este fallo se han visto afectados por el defecto de pérdida de aislamiento, mientras que los sistemas comerciales no han sido capaces de identificar el fallo. De este modo se puede admitir que el único sistema eficiente para la detección del defecto de pérdida de aislamiento es el desarrollado en este proyecto.

4.6. Ensayos de rotura de barras del rotor.

El defecto que se produce en este ensayo se obtiene con la rotura de barras del rotor del motor, lo que se busca con esto es producir un daño importante en el rotor que aunque no impide el funcionamiento del motor, si debe alternar el campo electromagnético que se forma entre el rotor y el estátor, y de esta manera que sea detectado por nuestro sistema.

4.6.1. Realización del ensayo

Para este ensayo se utiliza el rotor utilizado en el ensayo de rotura de barras del rotor del proyecto de la bibliografía [9], este rotor es el de la figura 4.22, donde como se puede observar se ha realizado un taladrado en el rotor fracturando una de las barras.

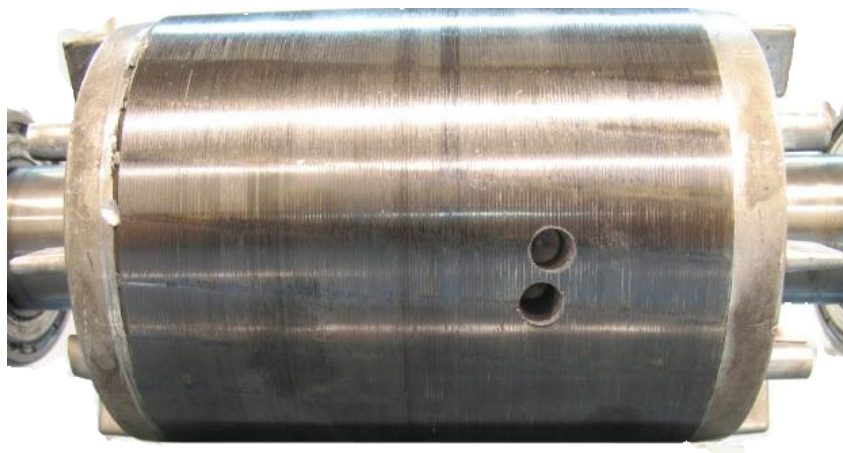


Figura 4.22: Rotor utilizado en el ensayo de barras fracturadas

4.6.2. Resultados obtenidos

Este defecto se caracteriza principalmente por un rizado en las intensidades a la frecuencia de $2sf_e$ que se ve claramente al obtener las intensidades como muestra la figura 4.23, esta frecuencia característica se ve reflejada en gran parte de la bibliografía trabajada en este proyecto.

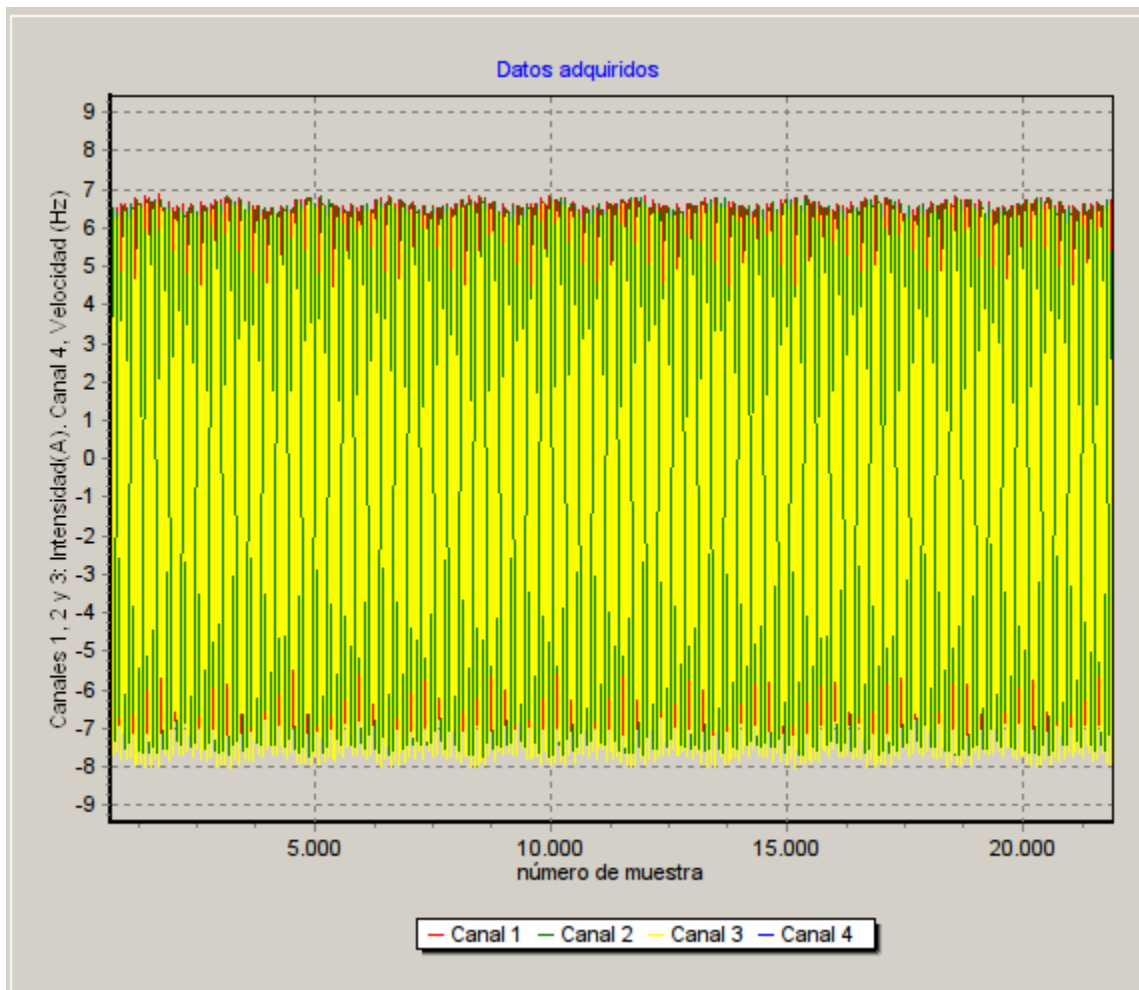


Figura 4.23: Intensidades en un ensayo de fractura de barras

Ademas como se expone en la sección 2.2.3 se intenta demostrar la validez de un nuevo punto del espectro, encontrado en la tesis de la bibliografía [8].

En la figura 4.24 se muestra el efecto del defecto de asimetría rotórica sobre todos los indicadores, se muestra una variación no solo en los indicadores que trabajan con este defecto, sino en el indicador Iee1 de excentricidad por ejemplo pero a una escala mas baja.

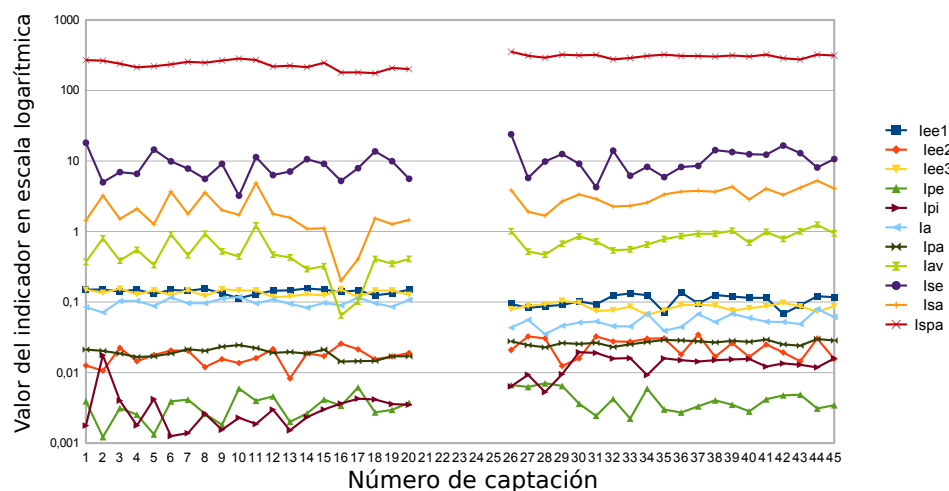


Figura 4.24: Representación de todos los indicadores en el motor normal (izquierda) y provocándole el defecto de asimetría rotórica (derecha), representación en escala logarítmica.

Técnica basada en el espectro frecuencial de la TME.

En la sección 2.2 se muestra la obtención de este indicador I_{ETMF}^a denominado Ia en el programa.

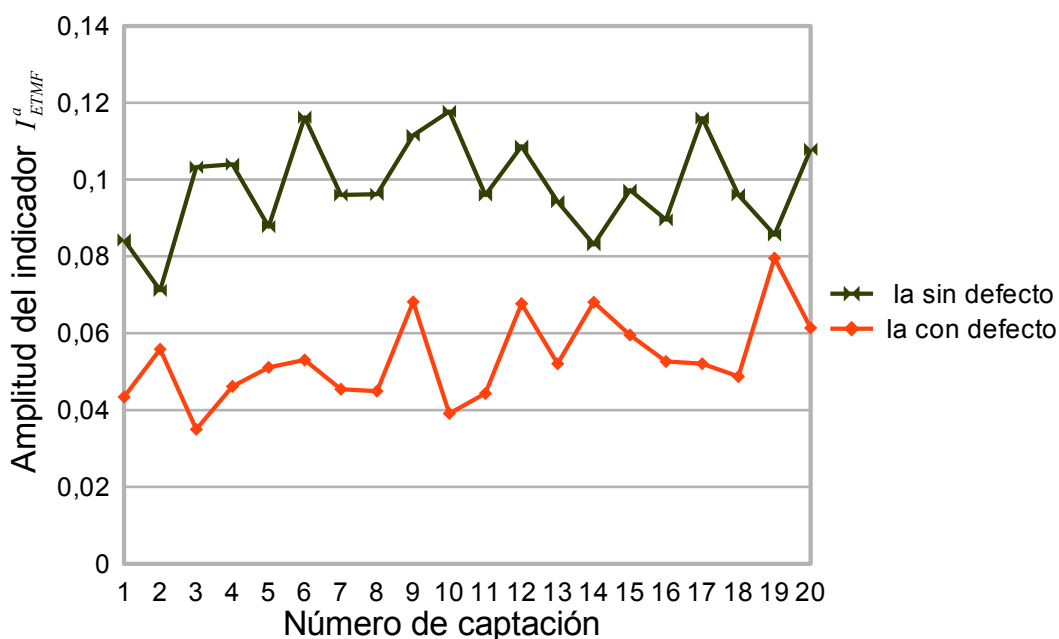


Figura 4.25: Evolución del indicador I_{ETMF}^a denominado Ia en el programa en el defecto de asimetría rotórica.

En la figura 4.25 se muestra la evolución de este indicador tanto en el motor normal como produciéndole el defecto, observándose que el indicador actúa adecuadamente pero en sentido inverso, es decir disminuyendo durante el defecto. Hay que estudiar las causas de que el indicador esté invertido.

Técnica basada en la relación entre la amplitud y la velocidad de giro de la TMF.

Para la obtención de este indicador (I_{A-V}^a , Iav en el programa) la bibliografía y como se explica en la sección 2.3, no solo da la manera de obtener el indicador, sino que se dan unos límites según el número de barras fracturadas como se muestra en la figura 4.26

INDICADOR DE LA AMPLITUD Y LA VELOCIDAD DE GIRO DE
LA TENSIÓN MAGNÉTICA FUNDAMENTAL:
Límite entre 0 y 1 barra fracturada: Iav = 3360
Límite entre 1 y 2 barra fracturada: Iav = 4480
Límite entre 2 y 3 barra fracturada: Iav = 5600
Iav = 0,672246542721664

Figura 4.26: Muestra de la referencia en pantalla del indicador I_{A-V}^a y los límites según el número de barras fracturadas

Como se observa debe de haber un problema de escala con este indicador o bien en los límites o en el propio indicador debido a la diferencia de miles en el orden de magnitud.

En la figura 4.27 se puede observar que el valor del defecto es aleatorio en algunos casos, y que se superponen los valores del indicador, pero fijándose no solo en la media, sino en los puntos máximos y mínimos que si hay una distinción entre el valor del indicador produciéndole el defecto, y sin producirse, dándolo como válido.

Técnica basada en la forma del orbital de la TMF

Como se ha mencionado en la sección 2.4 para obtener el orbital de asimetría rotórica se emplea la velocidad de giro instantánea del eje donde se obtiene un error como se refleja en el anexo B.4 de la página 87.

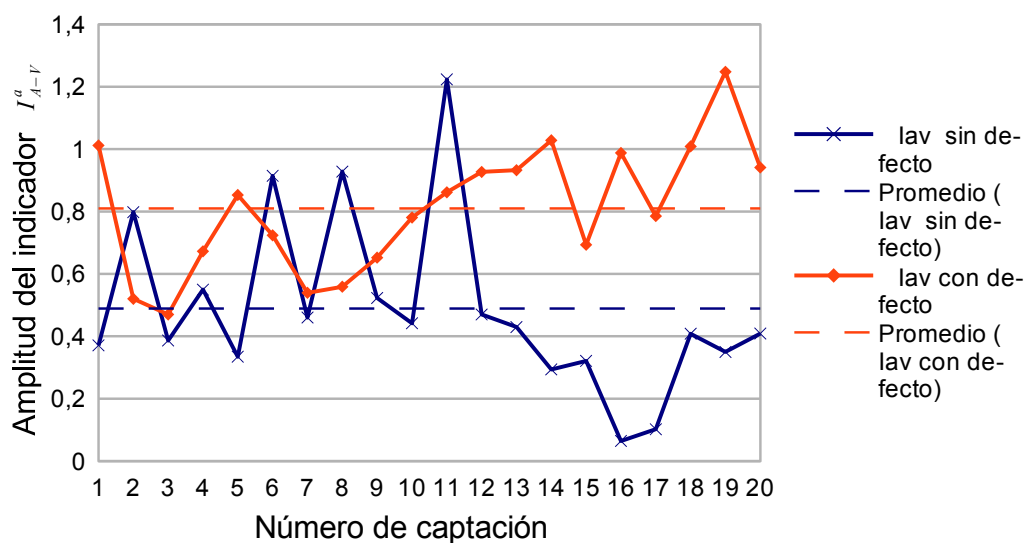


Figura 4.27: Muestra de la evolución del indicador I_{A-V}^a mientras se le producía el defecto al motor de rotura de barras

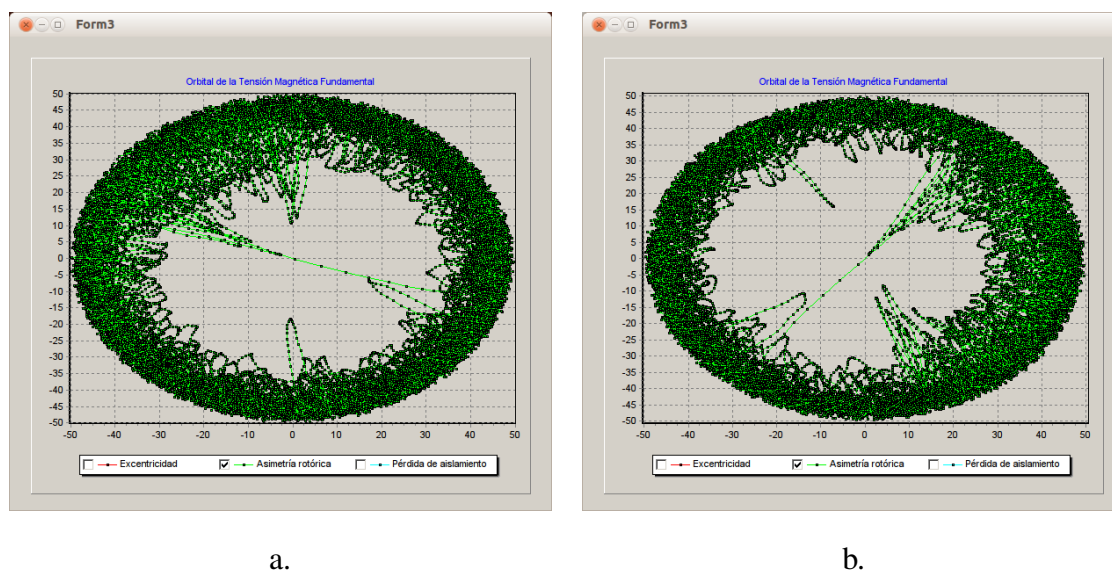


Figura 4.28: a.Orbital de asimetría rotórica en el ensayo con el motor en buen estado. b. Orbital de asimetría rotórica en el ensayo de asimetría rotórica.

En la figura 4.28 no se consigue diferenciar el defecto de asimetría rotórica debido a que la excentricidad en el eje del encoder produce una oscilación excesiva. De este modo tanto la figura *a* como *b* son casi idénticas, siendo imposible detectar el defecto.

Técnica basada en el deslizamiento instantáneo entre la tensión magnética y el rotor

Esta técnica se encuentra desarrollada en la sección 2.5, con el indicador I_S^a , o I_{sa} en el programa.

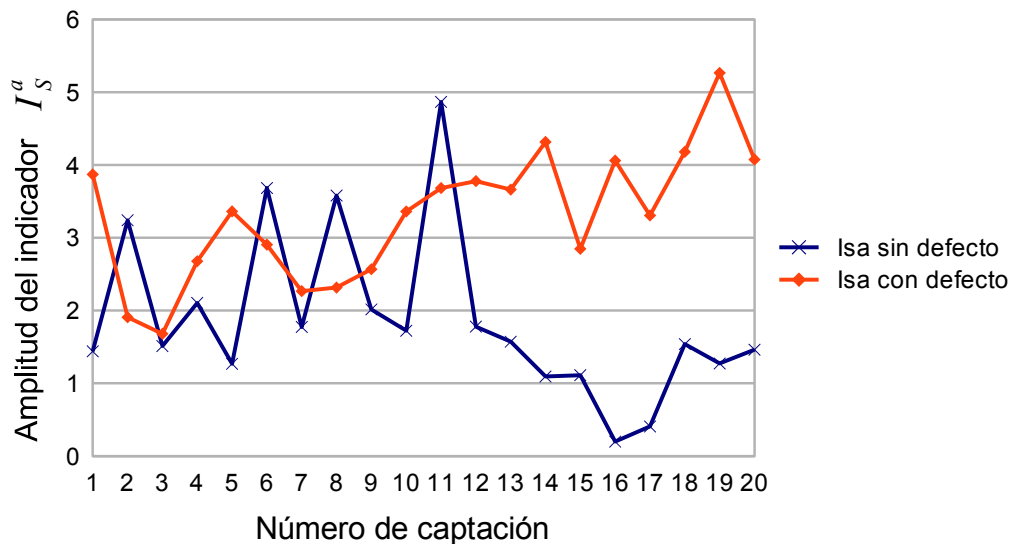


Figura 4.29: Muestra de la evolución del indicador I_S^a mientras se le producía el defecto al motor de rotura de barras

Como se puede observar claramente comparando las figura 4.27 y 4.29 la evolución de ambas curvas son casi idénticas pero a distinta escala, esto es debido a que trabajan con las mismas frecuencias ($2sf_e$), de este modo se puede confirmar lo mismo que en la figura 4.27, que el indicador parece correcto en su funcionamiento pero habría que ver a que se debe la componente aleatoria.

4.6.3. Sistemas comerciales

El sistema *One-Pro* detecta claramente este defecto a lo largo de todo el ensayo, mostrando el indicador correspondiente en el nivel de alarma mas alto (rojo) como se muestra en la figura 4.30.

Electrical Status Screen									
Operating Parameters	Rot Spd	Logic							
	24.3	MARCHA							
Parameters	C1	C2	C3	V1	V2	V3			
Power Factor	0.965	0.974	0.968				Running speed	24.3	
RMS Value	5.08	5.03	4.95	400	401	401	Demand power	3.38	
Peak Value	7.67	7.68	7.48	569	572	568	Motor load	93.8	
Crest Factor	1.51	1.52	1.51	1.42	1.43	1.42	Motor efficiency	83.5	
Impedance	78.9	79.7	80.9				OutPut power	2.82	
Static eccentricity							OutPut torque	18.4	
Dynamic eccentricity							Volt var. from NP	0.187	
Stator mech. damage							Rotor bar damage	7.00	
Bearing damage							Mech unbal misalign		
Electrical unbalanced	1.38			0.127			Line frequency	50.0	
THD All	3.51	3.58	3.60	1.49	1.57	1.58	Voltage Distorsion	99.4	
Max inrush current							THDF factor	93.6	
Duration							PolePass side bar	36.3	

Figura 4.30: Ventana de alarmas proporcionada por el sistema One-Pro durante el ensayo de rotura de barras.

El sistema MCM no se comporta bien ante este tipo de defectos según el proyecto final de carrera [9], que pese a ser un defecto de índole eléctrica, no es capaz de detectar el daño en el rotor.

4.6.4. Conclusión del ensayo.

Tanto el sistema comercial One-Pro como el sistema desarrollado en este proyecto son capaces de detectar este defecto, siendo evidente en los dos sistemas que están identificando el defecto de rotura de barras a lo largo de todo el ensayo.

Capítulo 5

Conclusiones y futuras líneas de trabajo

5.1. Conclusiones.

Tras realizar todos los ensayos experimentales detallados en el capítulo anterior, se procede a presentar las conclusiones obtenidas sobre los distintos sistemas estudiados según los resultados obtenidos.

5.1.1. Conclusiones sobre los indicadores.

Como ya se ha comentado, *todos los indicadores* desarrollados para la detección de *defecto de aislamiento y rotura de barras* en el rotor *han funcionado satisfactoriamente*, excepto el orbital en la detección del defecto de rotura de barras que al usar la velocidad instantánea no se ha apreciado ninguna variación entre los resultados en el motor en buen estado y en el mismo motor induciéndole el defecto.

Por otro lado tenemos los indicadores de defecto en rodamientos y excentricidad, los cuales aun siendo defectos distintos producen efectos similares por ser defectos relacionados con los apoyos del rotor, de hecho un defecto en un rodamiento suele llevar a un problema de excentricidad y viceversa.

En el *ensayo de excentricidad* se ha observado que los *indicadores de excentricidad estática han detectado mejor* el cambio en la severidad del defecto. Este hecho es coherente ya que la excentricidad producida en los ensayos han sido fundamentalmente de tipo estático y no dinámico. Además se ha detectado también *cierta sensibilidad en uno de los indicadores de defecto en rodamiento*, el diseñado para la detección de defecto en pista exterior. Los indicadores y orbitales afectados por la velocidad instantánea no han sido verificados en el defecto de excentricidad debido al error cometido en la captación de la misma.

En el ensayo de *defecto en rodamientos no se ha observado sensibilidad en ninguno de los indicadores diseñados para tal efecto, pero si* en uno de los *indicadores de excentricidad* estática. Este hecho anima a realizar un futuro estudio de este indicador para detectar este otro tipo de defecto.

Como se acaba de exponer, en todos los ensayos realizados se ha obtenido de una u otra manera algún cambio en los indicadores propios del defecto, demostrando la viabilidad del uso de estos indicadores para la detección de los defectos analizados.

5.1.2. Conclusiones sobre el sistema de captación.

La medida de las intensidades se realiza de *manera correcta* sin ningún error aparente. El sistema de captación de la *velocidad instantánea* tiene *errores evidentes* como se especifica en la sección B.4. Este hecho hace imposible el correcto estudio de algunos de los indicadores en los que se conjuga la velocidad instantánea, por otro lado las *mejoras* incorporadas en este proyecto para *reducir el error*, tanto mecánicamente, como a nivel de programación, han conseguido que pueda ser usada la velocidad instantánea por ciertos indicadores, dando un valor que se asemeja a la realidad y haciendo que funcionen algunos de los indicadores que usan estos datos como se puede observar por ejemplo en la sección 4.6.2 donde para obtener el deslizamiento instantáneo se trabaja con la velocidad instantánea del rotor.

5.1.3. Conclusiones sobre el programa.

Se ha conseguido desarrollar una herramienta software que permite, mediante una tarjeta de adquisición, medir los parámetros eléctricos y mecánicos de forma simultánea. Además proporciona utilidades tales como: la captación continua con el guardado de datos, o la graficación de los resultados obtenidos en tiempo real. Se ha conseguido el suficiente grado de depuración para no tener errores en tiempo de ejecución, convirtiéndose en una herramienta útil para la realización de los ensayos experimentales como se ha demostrado durante el proyecto.

El programa tiene ciertas limitaciones impuestas por el hardware usado para la captación y la librería usada para la realización de la transformada de Fourier, las cuales *no impiden* que el programa funcione eficientemente y realice su función demostrando el potencial que puede tener esta herramienta en futuros desarrollos, sabiendo que *el núcleo del programa funciona correctamente.*

5.1.4. Conclusión sobre el proyecto

Se ha llevado a cabo la culminación del objetivo principal marcado inicialmente: la *posibilidad de comprobar* de una manera sencilla el valor que se obtiene de *los distintos indicadores*. El único problema encontrado ha sido a la hora de medir la velocidad instantánea de giro, puesto que no se ha podido obtener unos valores totalmente fiables. Por este motivo ha sido imposible la validación de los indicadores que utilizan este parámetro.

Tras analizar los indicadores se ha comprobado que *el sistema de indicadores propuesto funciona de igual manera, o mejor* (para los indicadores que ha sido posible validar en este proyecto) *que los sistemas comerciales* con los que se ha comparado.

5.2. Futuras líneas de trabajo

Aunque se han completado los objetivos marcados en este proyecto hay ciertos aspectos sobre los que se puede profundizar para mejorar el resultado final, esto es debido a que no

ha sido posible solucionar algunos errores debido a la falta de disponibilidad de determinados dispositivos durante el desarrollo del proyecto, o debido a que no se ha encontrado el fallo hasta que no ha finalizado el mismo.

5.2.1. Sobre el sistema de captación

- Mejorar la captación de la velocidad instantánea en el eje que, a pesar de las mejoras logradas, introduce un error elevado debido principalmente a la excentricidad en la prolongación del eje, errores del contador y falta de sensibilidad del encoder.
- Introducir alguna técnica para eliminar los defectos con los que viene la tensión eléctrica de la red, y que producen una distorsión en nuestras medidas.

5.2.2. Sobre el software desarrollado

- Desarrollar el programa para trabajar con base de datos de forma que sea posible agilizar el estudio de la información y se facilite el acceso a la información guardada.
- Introducirle un sistema de alarmas a los diferentes indicadores.
- Implementar el modelo gráfico para el indicador de asimetría rotórica en la técnica de relación entre la amplitud y la velocidad de giro de la TMF que se encuentra desarrollada en el apartado 5.2.2. de la tesis [8].

5.2.3. Sobre los indicadores

- Estudiar, trabajar y reducir la sensibilidad de algunos indicadores a otros defectos para los que no han sido diseñados (como se muestra que ocurre en la sección 4.6.2).
- Estudiar la aplicación del defecto de excentricidad I_{ETMF}^{e1} (I_{ee1} en la nomenclatura del programa) para la detección de defectos en rodamientos como se expone en la sección 4.4.

- Observar que el indicador I_{ETMF}^a (Ia en la nomenclatura del programa) en el programa está invertido, es decir su valor es menor durante el defecto siendo confusa su lectura en futuros estudios.
- Estudiar la normalización de los indicadores para que se pueda cuantificar el nivel del defecto producido de forma mas sencilla, y que todos sean del mismo orden.

Bibliografía

- [1] W. C. Merrill A. Duyar, V. Eldem and T. Guo. *Fault detection and diagnosis in propulsion system: A fault parameter estimation approach*. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol. 17, nº.1, pp. 104-108, 1994.
- [2] Félix Cesáreo Gómez de León. *Tecnología del mantenimiento industrial*. Universidad de Murcia, Murcia, 1998.
- [3] Luis Fernando Arco Zamora Francisco Antonio Carvajar Martínez, José Manuel Ramírez Cruz. *Diagnóstico en línea y fuera de línea de motores de inducción de baja, mediana y alta tensión*.
- [4] Charles T. Hatch. *Anom Alert under the hood*. GE Measurament Control.
- [5] Caner Kuzkaya. *MCM under the hood*. Artesis A.S.
- [6] LEM. Ficha técnica del transductor de anillo HAS 50. <http://www.lem.com/docs/products/has%2050%20600-s%20e.pdf>.
- [7] G. Alonso Orcajo J. M. Cano Rodríguez J. Solares Sariego. M. Fernández Cabanas, M. García Melero. *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Marcombo, Barcelona, 1998.
- [8] José Luis Aguirre Martínez. *Estudio de anomalías en motores de inducción: modelización de defectos, análisis de técnicas de verificación avanzadas y desarrollo de nuevos métodos de diagnóstico*. Tesis doctoral, ETSII Universidad Politécnica de Cartagena, Abril de 2010.

- [9] Pedro Alberto Pérez Puerta. *Estudio sobre la eficacia de dos sistemas comerciales de verificación de defectos basados en el análisis de tensiones e intensidades. Aplicación sobre un equipo motobomba*. Proyecto final de carrera, ETSII Universidad Politécnica de Cartagena, 2012.
- [10] Pedro Raúl Antolinos Pérez. *Estudios y Análisis Sistemáticos para la prevención de averías en motores de inducción*. Proyecto fin de carrera, ETSII Universidad Politécnica de Cartagena, Julio 2001.

Anexo A

Banco de ensayos y sistemas comerciales.

A.1. Banco de ensayos

Para la realización de los ensayos experimentales se utiliza un banco de ensayos instalado en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica de Cartagena. El banco está constituido básicamente por un motor eléctrico acoplado a una bomba centrífuga que hace circular agua almacenada en un depósito, tomando el agua desde la base de este, e impulsándola hacia la parte superior del mismo.

El banco de ensayos representado en la figura A.1 se compone de:

1. Una estructura soporte de perfiles de aluminio.
2. Encoder instalado en el eje del motor para la obtención de la velocidad instantánea.
3. Motor asíncrono de 3 kW y 2 pares de polos conectado a una bomba centrífuga mediante un acoplamiento rígido.
4. Depósito de agua con aislamiento de fibra de vidrio.
5. Válvula de impulsión de la bomba.

6. Transductor de presión de impulsión.
7. Rotámetro de flotador para la medida del caudal.
8. Bomba centrífuga con carcasa anular, extracción trasera, montaje horizontal de una única etapa.
9. Transductor de presión de la aspiración de la bomba.
10. Válvula de aspiración.
11. Cuadro de alimentación y control del motor.
12. Cable de salida del cuadro de alimentación y control hacia el motor.

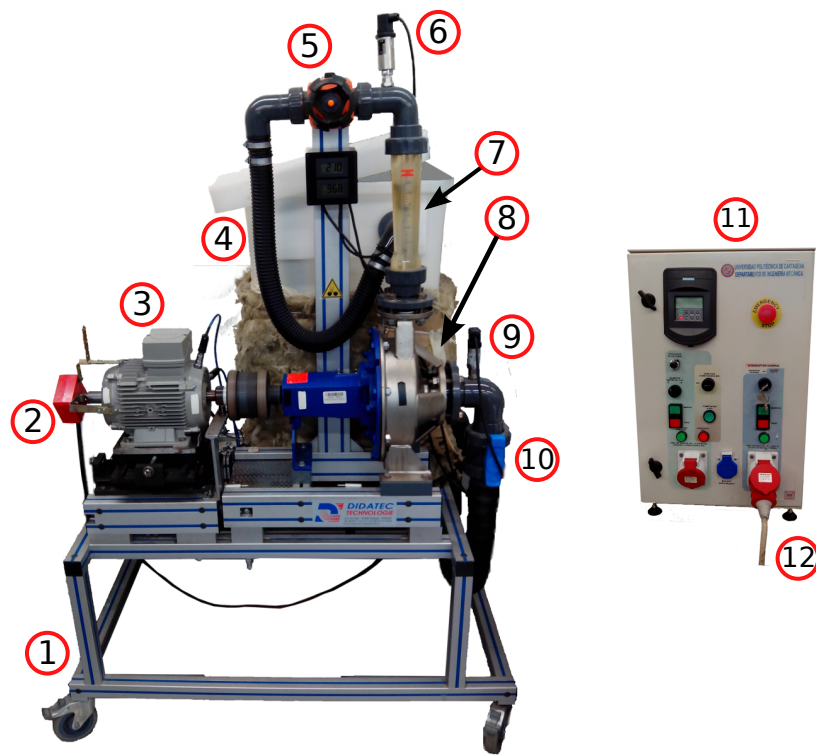


Figura A.1: Banco de ensayos utilizado.

A.1.1. Motor eléctrico

Se trata de un motor asíncrono trifásico de la marca Siemens, modelo *1LE10021AB522AA0*, con rotor de jaula de ardilla, con 28 barras y 36 ranura representado en la figura A.3, cuyas características nominales (conectado en estrella y con frecuencia 50 Hz) son las siguiente:

- Tensión: 400 V
- Intensidad: 6,3 A
- Potencia: 3 kW
- Factor de potencia: 0,85
- Rendimiento: 81,5 %
- Velocidad de rotación: 1425 rpm
- Peso: 21 kg
- Pares de polos: 2

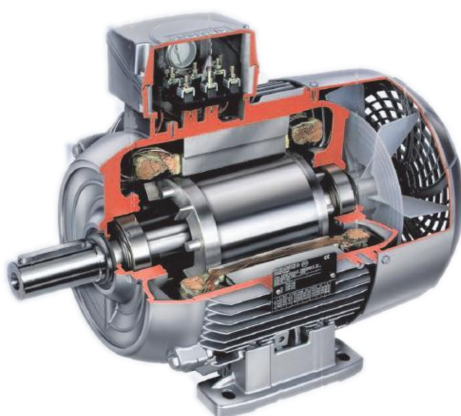


Figura A.2: Motor eléctrico Siemens 1LE10021AB522AA0.

A.1.2. Bomba centrífuga

Se trata de una bomba centrífuga de una sola etapa de la marca KSB, modelo Etacrhom NC 32-125 como se encuentra en la figura A.3. Es una bomba independiente de la máquina motriz (en este caso un motor eléctrico), que se acopla a su eje. Tanto el rodete como la carcasa están fabricados con acero inoxidable. Las características nominales de la bomba son:

- Caudal: $12 \text{ m}^3/\text{h}$
- Altura manométrica: 42 m
- Potencia: 3 kW
- Velocidad de rotación: 1450 rpm

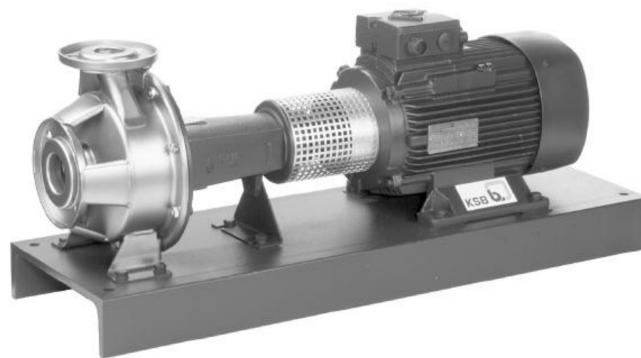


Figura A.3: Bomba centrífuga KSB Etacrhom NC 32-125

A.2. Sistemas comerciales.

Se pretende comparar los indicadores desarrollados en este proyecto con los dos sistemas comerciales de monitorización estudiados en el proyecto [9], estos dos sistemas son OneProD, de MetraVib, y MCM (Motor Condition Monitor), de Artensis.

A.2.1. Sistema OneProD

El sistema OneProD es un sistema capaz de realizar una monitorización del nivel de vibración de la máquina mediante la instalación de acelerómetros para hacer mantenimiento predictivo, al cual el fabricante le añadió a posteriori el módulo de análisis de señales eléctrica como complemento. El análisis de las vibraciones se hace a nivel de hardware, mientras que el de las señales eléctricas se hace completamente a nivel de software, por lo que es dependiente de un ordenador para operar con señales eléctricas.

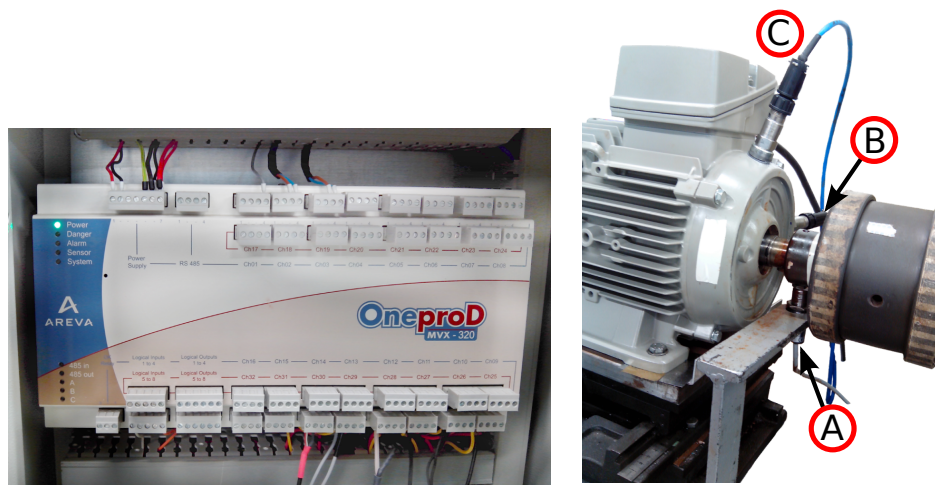


Figura A.4: Sistema OneProD. A) Sonda de velocidad. B) Acelerómetro horizontal. C) Acelerómetro vertical.

En la figura A.4 se pueden observar las tres sondas que necesita aparte de las intensidades para conseguir detectar los fallos: A) Sonda de velocidad. B) Acelerómetro horizontal. C) Acelerómetro vertical. Esto hace que a la hora de contractar su eficacia con la eficacia de los indicadores llevados a ensayo en este proyecto no sea equilibrada en cuanto a recursos utilizados.

A.2.2. Sistema MCM

El sistema MCM se compone de un módulo compacto que recibe las señales de corriente e intensidad de los transductores y realiza todos los cálculos a nivel de hardware, lo cual le brinda

una gran independencia, ya que el propio módulo da indicaciones con su pantalla LCD y con un sistema de LEDs sobre las posibles anomalías. La posible conexión con un ordenador sólo es necesaria para una representación más visual y detallada del estado del equipo monitorizado, además de para guardar el histórico en la base de datos, en la figura A.5 se muestra el módulo externo del sistema.



Figura A.5: Sistema de monitorización compacto MCM de Artesis

Anexo B

Sistema de medida.

B.1. Medida de las intensidades

La obtención de la medida instantánea de las intensidades se realiza a través de tres transductores de anillo instalados estos en cada una de las fases del motor dentro del cuadro de alimentación y control, estos transforman la medida de la intensidad en una diferencia de potencial que es capaz de interpretar la tarjeta de adquisición utilizando entradas analógicas.

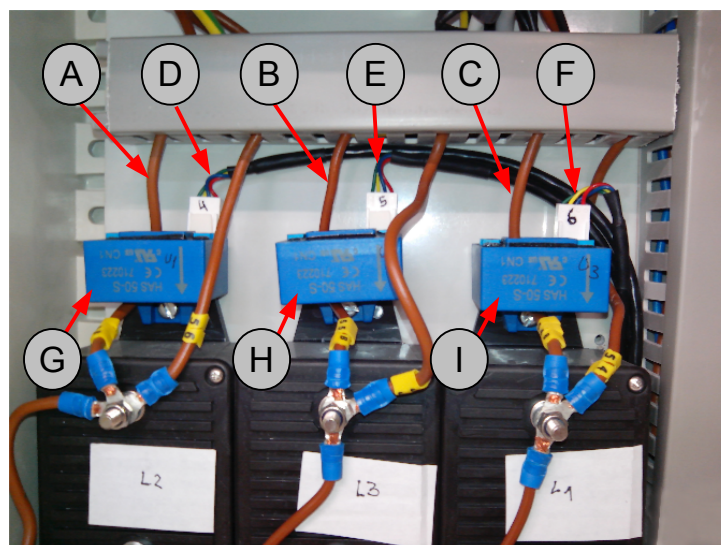


Figura B.1: Transductores de anillo instalados en las fases del motor.

En la figura B.1 se puede observar en los cables marcados por A, B y C las tres fases (I_r , I_s y I_t respectivamente) que van directamente al motor, los conectores marcados con D, E y F son las salidas ya en señal analógica que se conectan con la tarjeta de adquisición, y G, H e I son los tres transductores de anillos utilizados.

Hay que tener en cuenta que el motor está conectado en estrella para conocer de manera aproximada la medida final de las intensidades sabiendo las especificaciones del motor, a continuación se muestran los datos eléctricos obtenidos de la ficha técnica de los transductores [6].

	Tipo	HAS 50-S	
I_{PN}	Corriente nominal primaria (rms)	50	A
I_{PM}	Rango de medición primaria	± 150	A
V_C	Tensión de alimentación ($\pm 5\%$)	± 15	V
I_C	Consumo de corriente	± 15	mA
R_{IS}	Resistencia del aislamiento @ 500 VDC	>1000	$M\Omega$
V_{OUT}	Voltaje de la salida analogica @ $\pm I_{PN}$, $R_L = 10k\Omega$, $T_A = 25^\circ C$	$\pm 4V \pm 40$	mV
R_{OUT}	Resistencia interna de la salida (aproximada)	100	Ω
R_L	Resistencia de la carga	>1	$k\Omega$

Figura B.2: Datos eléctricos de los transductores de anillo usados

B.2. Medida de la velocidad

La medida de la velocidad instantánea en el eje no se ha conseguido obtener de una forma tan directa, con este fin se optó por la utilización de un encoder de 50 pulsos, el cuál utilizado junto con un contador digital nos daría en la tarjeta de adquisición, mediante algunos algoritmos complementarios (mirar la sección C.1 del anexo), la velocidad instantánea de rotación del eje.

Para conseguir el acoplamiento con el eje se retira el ventilador y se incorpora una extensión en el eje con el que a través de un tornillo de métrica 8 y un casquillo de aluminio echo a medida se consigue acoplar el rotor del encoder. El estátor del encoder se acopla con el estátor

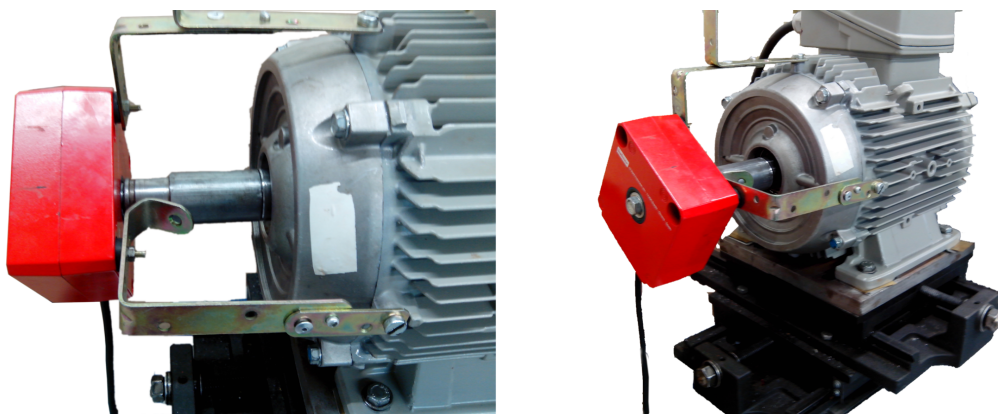


Figura B.3: Instalación del encoder utilizado para la medida de la velocidad instantánea de rotación

del motor utilizando cuatro escuadras remachadas, intentando darle la suficiente flexibilidad en la colocación de las mismas y con la utilización de arandelas de goma, para que el encoder no sufra demasiado por culpa de una excentricidad que existe entre el tornillo y el acoplamiento del eje, esto se estudiará en el capítulo B.4 de la página 87 de este anexo. El resultado final se muestra en la figura B.3

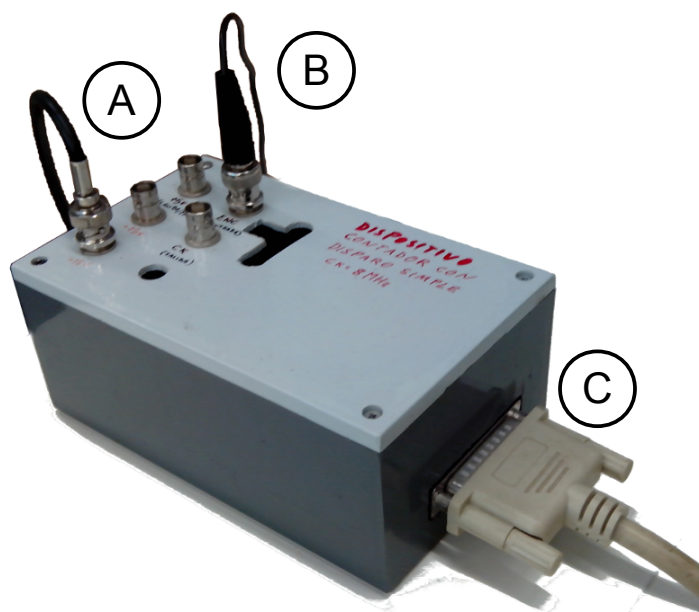


Figura B.4: Contador casero usado para conseguir la medida instantánea de la velocidad. A) Salida a 15V hacia el encoder, B) Divisor de tensión antes de la entrada a 5V y C) Salida digital hacia la tarjeta adquisición.

Debido a la retirada del ventilador con el que viene el motor para conseguir el acoplamiento con el encoder, en todas las pruebas realizadas se usa un ventilador industrial externo, aparte de utilización de tapas en el motor con suficiente espacio entre el eje y el comienzo de la tapa que consiguen la refrigeración de los rodamientos.

La medida del encoder pasa directamente a un contador, el encoder trabaja a 15V (alimentado gracias al propio contador(A)) pero el contador trabaja con señales de 5V, para solucionar este problema se utiliza un *divisor de voltaje* en la entrada del contador (B), el resultado final se observa en la figura B.4. El contador trabaja a $8MHz$ y de el se obtiene una señal digital que es transmitida directamente a la tarjeta de adquisición (C).

B.3. Tarjeta de adquisición y comunicación con el ordenador

Para conseguir tomar la medida de velocidad y de las tres intensidades se usa una tarjeta de adquisición, y se configura para que obtenga los datos en el mismo instante de tiempo. Se considera que la obtención de la velocidad no tiene retraso. Esta consideración se obtiene después de realizar una prueba de parada y arranque, y observar que para nuestra medida no tiene suficiente retraso como para considerar el retraso.

La tarjeta de adquisición utilizada es un Sistema de adquisición de datos de 16bit y $1MHz$ de la marca *IOtech* modelo *WaveBook/516* como se observa en la figura B.5, el punto referenciado como A son las ocho entradas analógicas de la tarjeta, y la novena el Trigger, se puede observar que están conectadas las tres primeras con la salida de los tres anillos que son las tres intensidades que alimentan el motor, la entrada B es la entrada digital, por ella alimenta el contador e indirectamente el encoder, y se recibe la señal digital del contador que tras las transformaciones necesarias es la velocidad instantánea del rotor, el punto referenciado como C en la imagen es la salida digital que se conecta como se verá a continuación al ordenador utilizado, y el punto D la alimentación a la red mediante un transformador externo.

La tarjeta de adquisición se puede conectar al ordenador mediante un puerto serie, pero para conseguir la máxima eficiencia y velocidad en la conexión se opta por usar un adaptador compatible con la tarjeta de adquisición que consigue conectarse con el protocolo Fast EPP y llegar

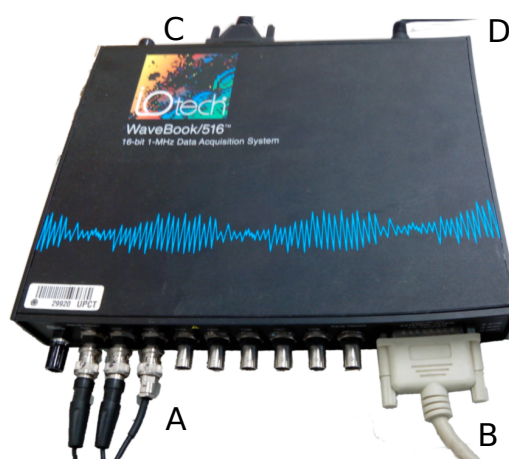


Figura B.5: Tarjeta de adquisición WaveBook/516 donde los puntos referenciados son: A) entradas analógicas. B) Entrada digital. C) Salida de datos digital. D) Alimentación.

a una velocidad de 816300 Hz. Se emplea una tarjeta PCMCIA/EPP modelo WBK20A que se introduce en una ranura Tipo II PC-Card disponible en uno de los equipos del departamento como se muestra en la figura B.6.



Figura B.6: Adaptador compatible con la tarjeta de adquisición modelo WBK20A.

Por último y para conseguir utilizar el equipo es necesario la obtención y correcta instalación de los drivers necesarios, el equipo viene con unos drivers desfasados incapaces de realizar la conexión en *windows xp*, y la página del fabricante ya no se encuentra operativa, por suerte se consiguen de una base de datos de una empresa privada, obteniendo la última versión de los drivers como se muestra en la figura B.7 y consiguiendo una correcta conexión.

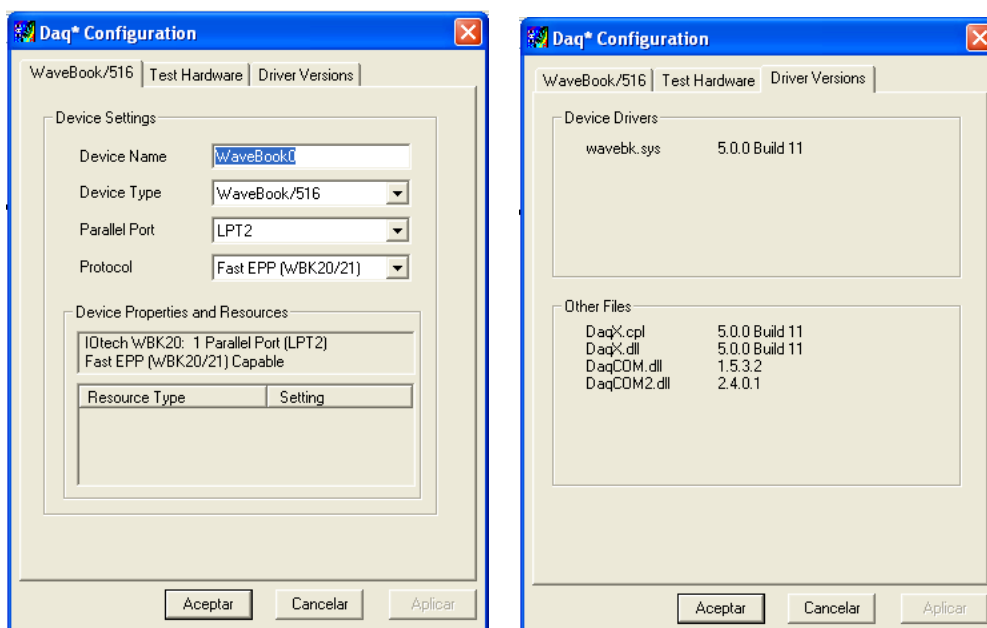


Figura B.7: Drivers utilizados y última versión utilizada para la correcta conexión de la tarjeta de adquisición WaveBook/516

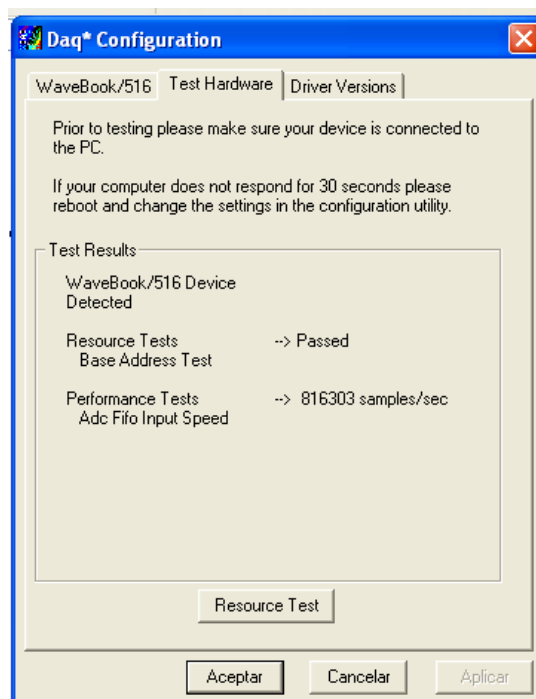


Figura B.8: Ensayo de conexión entre la tarjeta de adquisición y los drivers instalados en el equipo.

Para comprobar la correcta conexión y utilización de los drivers se realiza un ensayo de conexión desde los mismos drivers, como se muestra en la siguiente figura B.8 donde se consiguen *816303 muestras por segundo*.

La conexión entre el programa realizado en *Delphi7* y los drivers se realiza a través de la librería *Daqx.pas* facilitada por el director de proyecto.

B.4. Medida del error de la obtención de la velocidad instantánea

Tras la incorporación del encoder para la medida de la velocidad se observa que el taladrado realizado en la extensión del eje no se encuentra en el centro de giro de la pieza, produciendo una excentricidad en el rotor del encoder de $1,5\text{mm}$ en el diámetro. Esta excentricidad se consigue corregir hasta quedarse en $0,5\text{mm}$ gracias a la elaboración de un acoplamiento excéntrico pero no es suficiente. Para la medida de la repercusión de esta excentricidad se compara con la medida de la velocidad mediante el sistema láser representado en la figura B.9, y utilizándolo con la misma tarjeta de adquisición con la que se desarrolla este proyecto.



Figura B.9: Instrumentación láser usada para la medida del error en la captación de la velocidad.

Aunque la medida con el láser tiene un retraso considerable, no se va a tener en cuenta ya que se va a realizar la comparación en el dominio de la frecuencia. Se capta con ambos

equipos la velocidad instantánea a 2000 Hz . La medida del láser tiene una fuerte componente aleatoria, para corregir este efecto se opta por la utilización de la función de correlación. Tras la realización de este proceso se realiza la transformada rápida de Fourier (FFT) de las dos señales y se grafican en la figura B.10, la amplitud de la señal representada se encuentra en tanto por mil, para que sean comparables.

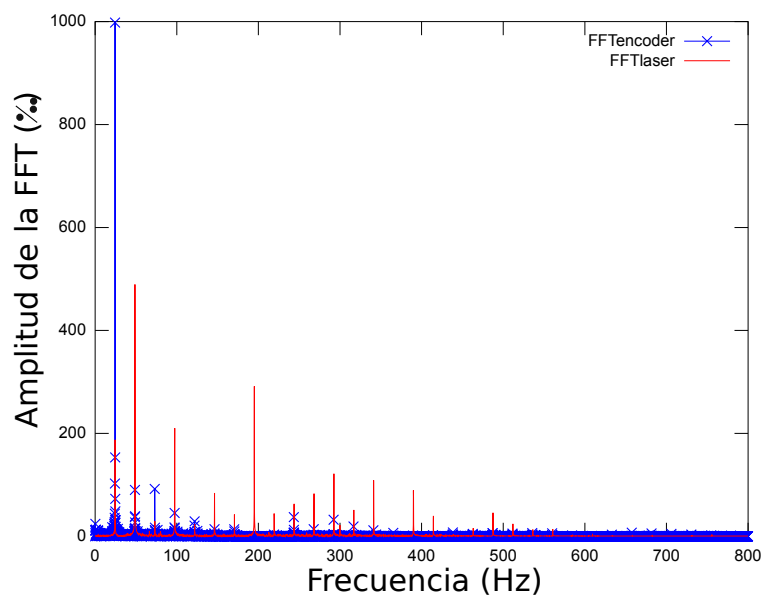


Figura B.10: Medida del error de la captación de la velocidad comparándola con la velocidad captada por el sistema láser del laboratorio

En esta gráfica se observa con bastante claridad que la excentricidad en el eje produce a la velocidad de giro ($\approx 24\text{ Hz}$) un valor desorbitado en comparación con los demás valores obtenidos en el encoder, mientras que en la medida tomada con el láser se observa que la variación de velocidad máxima se produce al doble de la velocidad de giro, además hay varios armónicos en los múltiplos de la velocidad de giro que en la medida tomada con el encoder apenas son apreciables.

Tras este pequeño estudio se llega a la conclusión de que el sistema de captación de velocidad no es suficientemente eficiente y hay que mejorarlo para obtener una medida sobre la que poder trabajar en futuros estudios.

Anexo C

Algoritmos característicos.

A la hora de realizar el programa se han tenido que solucionar los problemas que han ido surgiendo en base a los recursos del programador, en este anexo se van a detallar aquellos algoritmos que mejoran en mayor medida el correcto funcionamiento del programa.

C.1. Corregir la captación de la velocidad

La velocidad procedente de la entrada digital se obtiene después de pasar por el contador de donde se obtienen distintos errores.

C.1.1. Iniciación de la matriz de velocidades y descarga del buffer.

La librería usada para obtener la información de la tarjeta de adquisición guarda todos los datos en un buffer del que hay que extraer posteriormente la información. En este vector (buffer) se guardan los datos de manera lineal en el tiempo, es decir que se guardan las cuatro señales captadas en un tiempo determinado, y después las cuatro siguientes señales captadas en el siguiente tiempo. Esto hace que si se quiere extraer una señal determinada, haya que ir

multiplicando por el número de canales (numChans) constantemente como se observa en el código adjuntado.

En la entrada de la tarjeta de adquisición se obtiene la información que proporciona el contador, hay que tener en cuenta la función del contador, es decir contar el tiempo (a una velocidad de $8MHz$) entre un pulso del encoder y el siguiente. Como una vuelta completa del encoder son 50 pulsos, esto quiere decir que la velocidad en hercios del encoder será:

$$Velocidad \left[\frac{Vuelta}{Segundo} \right] = \frac{8 \cdot 10^6 \left[\frac{N^o dato}{Segundo} \right]}{50 \left[\frac{pulsos}{vuelta} \right] \cdot buffer \left[\frac{N^o dato}{Pulso} \right]}$$

Para poder obtener el primer valor de velocidad tenemos que buscar el primer valor representativo entre pulso y pulso del encoder que realiza el contador, para ello usamos la línea 3 del código adjuntado, y guarda el lugar donde se encuentra este valor en la variable i . En la línea 4 le atribuye este valor al primer valor del vector velocidad.

A partir de este valor, ya se van buscando las captaciones donde el contador actúa para atribuirle ese valor a todos los datos hasta el siguiente pulso encoder donde se realiza la misma operación. La tercera opción del “if” (línea 12) es para el caso en que el contador se reinicie por haber llegado a su máximo de 65536 datos (2^{16}).

```

1  //Descargamos la velocidad de la entrada digital del buffer en canal
2  i:=0;
3  While buffer[i*numChans]>= buffer[i*numChans+numChans] do i:=i+1;
4  velocidad[0]:= 8000000/50/(buffer[i*numChans+numChans]-buffer[i*
    numChans]);
5
6  For j:=0 to numScans+StrToInt (Form2.LabeledEdit8.Text)-2 do
7      begin
8          If buffer[j*numChans]=buffer[j*numChans+numChans] then
9              velocidad[j+1]:=velocidad[j]
10         else if buffer[j*numChans]< buffer[j*numChans+numChans] then

```

```

11      velocidad[j+1]:=8000000/50/(buffer[j*numChans+numChans]-buffer
      [j*numChans])
12      else
13          velocidad[j+1]:=8000000/50/(65536+buffer[j*numChans+numChans]-
      buffer[j*numChans]);
14      end;

```

Hay que considerar que para poder hacer el alisado de la señal posterior hay que tomar datos de más, para poder centrar la señal, de ahí el uso de la variable *Form2.LabeledEdit8.Text* que es donde se guarda el valor configurado en la ventana correspondiente.

C.1.2. Eliminar errores cometidos por el contador.

Una vez adquiridos los datos y pasados al vector velocidad se observa que el contador produce fluctuaciones en algunos de los datos tomados como se observa en la figura C.1, en el dato 923.

Para solucionar estos errores y viendo la variación normal de la velocidad no supera en ninguno de los casos 10 puntos lo que se realiza es que si el dato adquirido sobrepasa de este límite de 10 % del dato adquirido con anterioridad, este dato se sustituye por el valor del dato anterior. A continuación se muestra el código empleado para este fin:

```

1  //Eliminar errores del contador
2  For j:=0 to numScans+StrToInt (Form2.LabeledEdit8.Text)-2 do
3      begin
4          If velocidad[j+1] > (velocidad[j]*1.1) then velocidad[j+1]:=
      velocidad[j];
5          If velocidad[j+1] < (velocidad[j]*0.9) then velocidad[j+1]:=
      velocidad[j];
6      end;

```

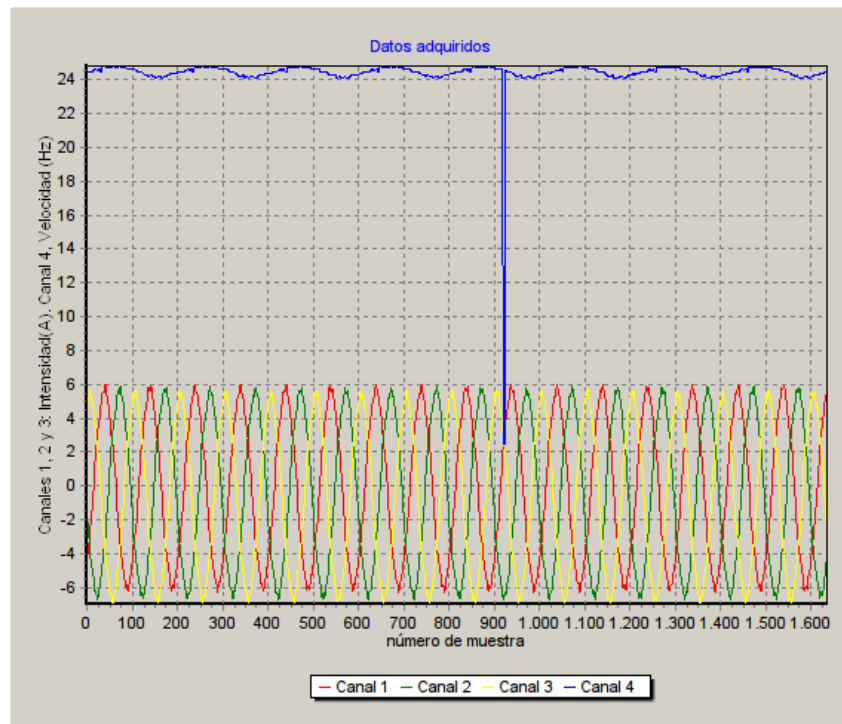


Figura C.1: Ventana de adquisición de datos mostrando un fallo típico del contador en la muestra 923.

C.1.3. Suavizar la curva de velocidades.

Tras corregir los errores de la velocidad anteriormente explicados se obtiene la señal de la figura C.2, como se observa es una señal muy abrupta donde se consigue identificar un patrón que no se obtiene del eje (como se mostró en el anexo B.4 en la medida del laser) y que siempre se identifica una vez por vuelta como se identifica en la figura rodeada de color rojo, además no aparece siempre en el mismo ángulo del eje.

Para intentar corregir este error en la medida de lo posible se le aplica una media móvil, que suaviza la forma abrupta de la velocidad, y además rebaja el error marcado de rojo en la figura C.2.

Hay que tener en consideración que lo que se está midiendo son tiempos no espacios, por lo que la media de las velocidades en este caso no es la media directa de la velocidad, sino hay que realizar la media de la inversa de la velocidad para así obtener la media de los tiempos como se muestra en el código siguiente:

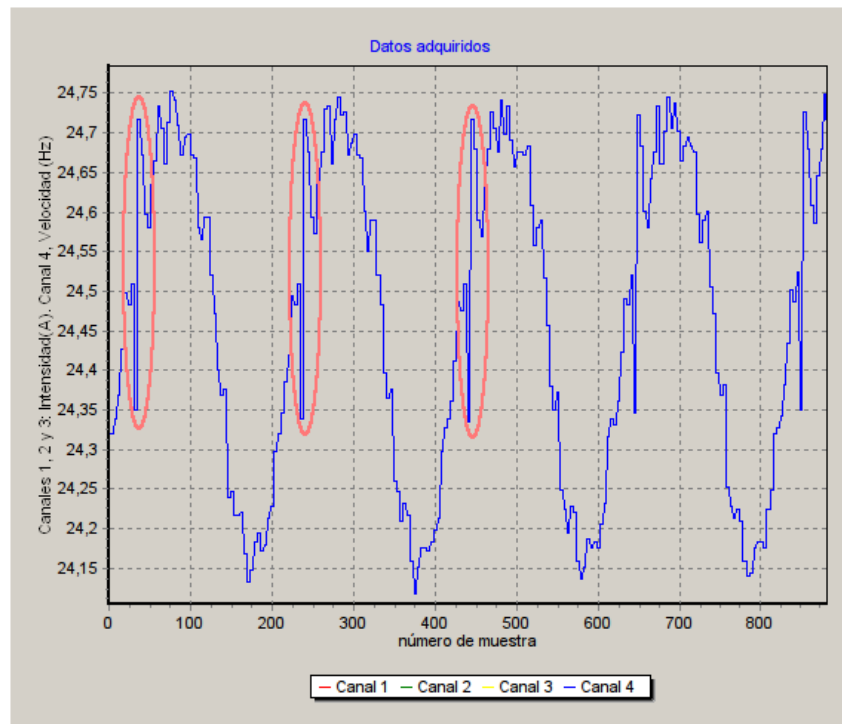


Figura C.2: Ventana de adquisición de datos mostrando la señal de la velocidad antes de realizarle la media móvil.

```

1  //Suavizar velocidades
2  For j:=0 to numScans-1 do
3      begin
4          For i:=0 to StrToInt(Form2.LabeledEdit8.Text)-1 do
5              Canal[3,j]:=Canal[3,j]+1/velocidad[j+i];
6              Canal[3,j]:=StrToInt(Form2.LabeledEdit8.Text)/canal[3,j];
7          end;

```

La velocidad se guarda directamente en la cuarta fila de la matriz *Canal* para seguir trabajando con ella, y el vector *velocidad* se elimina al finalizar la captación. Al terminar con el procesamiento de la señal de la velocidad obtenemos una señal como la de la figura C.3 donde se puede apreciar la mejora respecto la anterior señal.

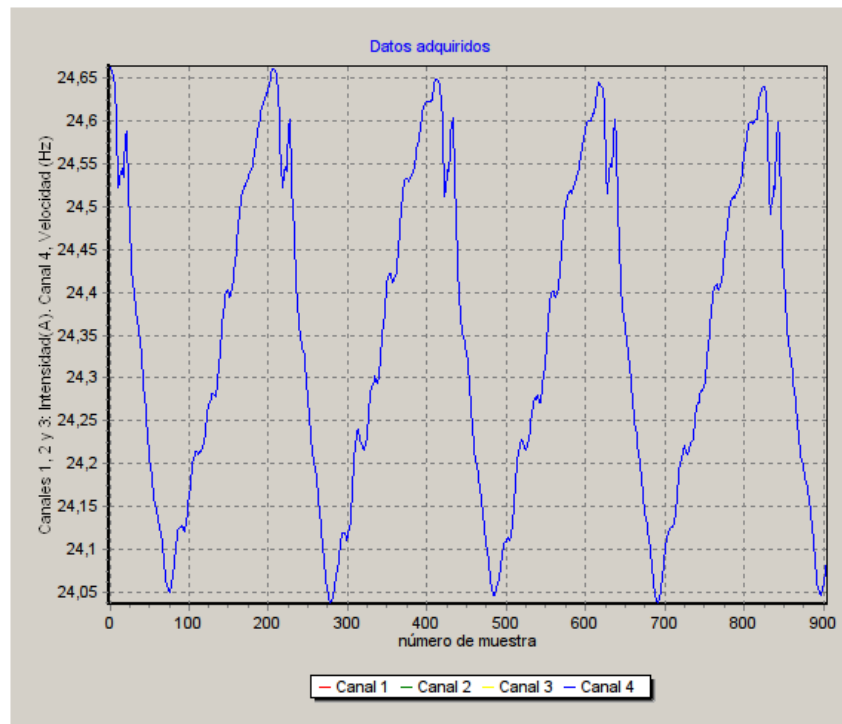


Figura C.3: Ventana de adquisición de datos mostrando la señal de la velocidad después de realizarle la media móvil.

C.2. Obtención del orbital.

En la versión de Delphi utilizada no existe ninguna librería que sea capaz de realizar diagramas polares de forma directa, de este modo se opta por la creación de una gráfica polar a partir de una rectangular aplicando las ecuaciones siguientes:

$$\begin{cases} X = A \cdot \cos \alpha \\ Y = A \cdot \sin \alpha \end{cases}$$

Donde A es la amplitud de la señal en coordenadas polares, y la variable *OrbitalY* en el código. En la ecuación α es el ángulo en coordenadas polares, y la variable *Orbitalx* en el código. Hay que tener en cuenta que hay tres orbitales distintos donde solo varía la obtención del ángulo, guardados estos en las tres filas de la matriz *Orbitalx*.

```

2  For i:=0 to NumScans do
3      begin
4          Form3.Series1.AddXY(Orbitaly[i]*cos(Orbitalx[0,i]),Orbitaly[i]
              ]*sin(Orbitalx[0,i]));
5          Form3.Series2.AddXY(Orbitaly[i]*cos(Orbitalx[1,i]),Orbitaly[i]
              ]*sin(Orbitalx[1,i]));
6          Form3.Series3.AddXY(Orbitaly[i]*cos(Orbitalx[2,i]),Orbitaly[i]
              ]*sin(Orbitalx[2,i]));
7      end;

```

C.3. Velocidad media de giro

Como ocurre la con la media móvil en la obtención de la media total de la velocidad de giro no se puede trabajar directamente con su media, sino que hay que realizar la media de la inversa. Para realizar esta función nos apoyamos de las variables auxiliares x e i , siendo la velocidad de giro media Fg . Recordar que la velocidad instantánea se encuentra guardada en la cuarta fila de la matriz *Canal* de ahí el uso de *Canal[3,i]*

```

1  //Obtencion de la velocidad media de giro (Hz)
2      Fg:=0;
3      x:=0;
4      For i:=0 to numScans-1 do
5          x:=x+1/Canal[3,i];
6      Fg:=numScans/x;

```

C.4. Búsqueda de los picos al obtener indicadores.

Debido a la incapacidad del sistema para obtener la frecuencia de red o la velocidad de giro del rotor de forma exacta, los indicadores no se sitúan exactamente en los picos de frecuencia

buscados, que como se puede observar en la figura C.4 la diferencia de amplitud entre valores contiguos es considerable.

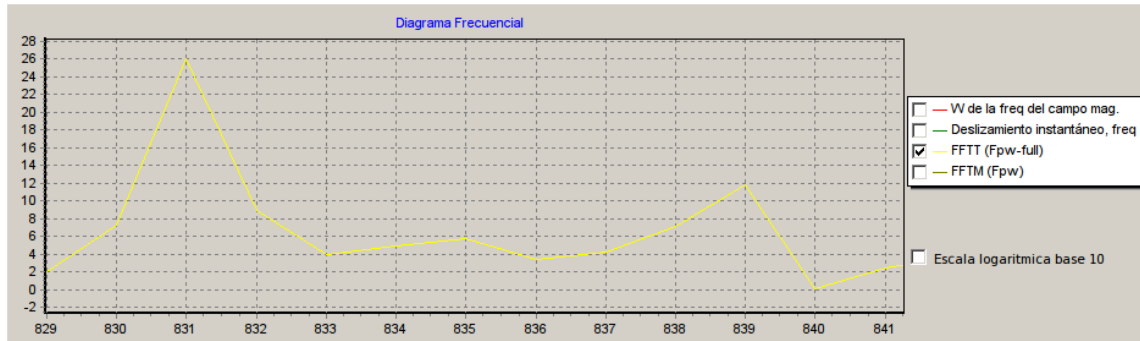


Figura C.4: Zoom del diagrama frecuencial mostrando en el eje de abscisas en número de dato, y en el de ordenadas la amplitud de F_{w-full}^p

Por este motivo cuando la frecuencia buscada del indicador cae entre dos valores de la matriz que trabaja con frecuencias se opta por usar el mayor valor de los dos valores contiguos, que se supone que será el más cercano al pico de frecuencia buscado.

Para realizar esta función se utiliza la siguiente ecuación:

$$Valor\ maximo = \frac{A + B}{2} + \frac{|B - A|}{2} = \frac{A + B + |B - A|}{2}$$

A continuación se muestra un ejemplo en la programación a la hora de obtener el indicador I_{ETMF}^{e1} (Iee1 en lenguaje de programación), donde se muestra la aplicación de la función anterior. En las líneas 2,3,5,6 se le asigna el valor a las variables “a” y “b” antes de realizar la función en las líneas 4 y 7 con la completa aplicación para obtener el indicador en la línea 8. La ecuación para este indicador se encuentra en la sección 2.2, siendo la ecuación 2.3 de la página 10.

```

1 //Excentricidad
2 a:= Fwpn[Trunc((fe-fg)*l/freq)];
3 b:= Fwpn[Trunc((fe-fg)*l/freq)+1] ;
4 c:= ((a+b)+abs(b-a))/ 2;
5 a:= Fwpn[Trunc((fe+fg)*l/freq)];

```

```
6      b:= Fwpn[Trunc((fe+fg)*1/freq)+1];  
7      d:= ((a+b)+abs(b-a))/ 2;  
8      Iee1:=sqrt((c+d)/2);
```

Las variables a, b, c y d son variables auxiliares usadas para poder aplicar la función, quedando mas clara y quitando la posibilidad de cometer errores. La función *Trunc()* convierte un número real a un número entero truncando el resultado, y la función *abs()* realiza el valor absoluto.

